

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный
архитектурно-строительный университет

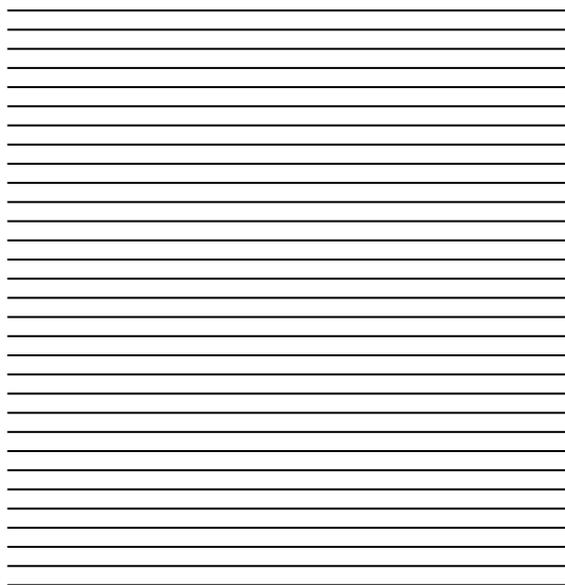
ВЕСТНИК

ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Том 26

№ 3 2024
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с апреля 1999 г.



РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ляхович Л.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, профессор кафедры строительной механики ТГАСУ, г. Томск; lls@tsuab.ru
Акимов П.А., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ректор МГСУ, г. Москва; pavel.akimov@gmail.com
Белостоцкий А.М., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, ген. директор научно-исследовательского центра СтаДиО, г. Москва; amb@stadyo.ru
Беккер А.Т., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, научный руководитель политехнического института ДВФУ, г. Владивосток; bekker.at@dvfu.ru
Бондаренко И.А., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, директор НИИТИАГ, филиал ЦНИИП Минстроя России, г. Москва; nititag@yandex.ru
Власов В.А., докт. физ.-мат. наук, профессор, советник РААСН, ректор ТГАСУ, г. Томск; rector@tsuab.ru
Волокитин Г.Г., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой прикладной механики и материаловедения ТГАСУ, г. Томск; vgg-tomsk@mail.ru
Волокитин О.Г., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, проректор по учебной работе ТГАСУ, г. Томск; study@tsuab.ru
Галяутдинов З.Р., докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; zgaryautdinov@tsuab.ru
Гныря А.И., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, профессор кафедры технологии строительного производства ТГАСУ, г. Томск; tsp_tgasu@mail.ru
Детярев В.В., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой гидротехнического строительства, безопасности и экологии НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; ngasu_gts@mail.ru
Есаулов Г.В., докт. архитектуры, профессор, академик РААСН, проректор по научной работе МАРХИ, г. Москва; gvesaulov@raasn.ru
Ефименко В.Н., докт. техн. наук, профессор кафедры автомобильных дорог ТГАСУ, г. Томск; svefimenko_80@mail.ru
Ефименко С.В., докт. техн. наук, проректор по научной работе ТГАСУ, г. Томск; svefimenko@tsuab.ru
Зайченко Н.М., докт. техн. наук, профессор, ректор ДонНАСА, г. Макеевка; mailbox@donnasa.ru
Ильичев В.А., докт. техн. наук, профессор, вице-президент РААСН, академик РААСН, г. Москва; ilyichev@raasn.ru
Каприелов С.С., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, зав. лабораторией НИИЖБ, г. Москва; kaprielov@masterbeton-mb.ru
Копаница Н.О., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; kopanitsa@mail.ru
Кудяков А.И., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; kudyakov@tsuab.ru
Кумпьяк О.Г., докт. техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры железобетонных конструкций ТГАСУ, г. Томск; kumpyak@yandex.ru
Лотов В.А., докт. техн. наук, профессор кафедры строительных материалов и технологий ТГАСУ, г. Томск; valotov@tpu.ru
Люсия Тсантилис, доцент кафедры охраны окружающей среды, земельных ресурсов и организации инфраструктуры Туринского политехнического университета, г. Турин, Италия; lucia.tsanilis@polito.it
Морозов В.И., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой строительных конструкций СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург; morozov@spbgasu.ru
Овсянников С.Н., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий ТГАСУ, советник РААСН, г. Томск; ovssn@tsuab.ru
Орозбеков М.О., докт. техн. наук, профессор ОмГУ, г. Омь, Кыргызская Республика; oshsu@mail.ru
Поляков Е.Н., докт. искусствоведения, канд. архитектуры, профессор кафедры теории и истории архитектуры ТГАСУ, член Союза архитекторов России, г. Томск; polyakov-en@ya.ru
Ситникова Е.В., канд. архитектуры, доцент кафедры реставрации и реконструкции архитектурного наследия ТГАСУ, г. Томск; elensi@vtomske.ru
Сколубович Ю.Л., докт. техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, ректор НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск; sjl1964@mail.ru
Тептаев Б.Б., докт. техн. наук, профессор, академик Национальной инженерной академии РК и Международной академии транспорта, г. Алматы, Республика Казахстан; bagdabtb@yahoo.com
Травуш В.И., докт. техн. наук, профессор, академик РААСН, вице-президент РААСН, г. Москва; travush@mail.ru
Цветков Н.А., докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой теплогазоснабжения ТГАСУ, г. Томск; nac@tsuab.ru
Шубенков М.В., докт. архитектуры, профессор, вице-президент РААСН, зав. кафедрой градостроительства МАРХИ, г. Москва; shubenkov@gmail.com
Шубин И.Л., докт. техн. наук, чл.-корр. РААСН, директор НИИСФ РААСН, г. Москва; niisf@niisf.ru
Чулин В.Р., докт. техн. наук, профессор, советник РААСН, зав. кафедрой городского строительства и хозяйства ИНИТУ, г. Иркутск; chupinvr@ex.istu.edu

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ

Журнал «Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета» (подписной индекс 20424) включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по строительству и архитектуре, утвержденный решением Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 17.06.2011 г.

Электронные версии журнала «Вестник ТГАСУ» представлены на сайтах «Научная электронная библиотека»: www.elibrary.ru; «Российская книжная палата»: <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; «Российская государственная библиотека»: <https://www.rsl.ru/>; «Томская областная универсальная научная библиотека имени А.С. Пушкина»: <https://www.lib.tomsk.ru/>; «EBSCO»: <https://www.ebsco.com/>; «КиберЛенинка»: <https://cyberleninka.ru/>; «IPRbooks»: www.iprbookshop.ru, а также на сайте «Вестник ТГАСУ»: <https://vestnik.tsuab.ru>

Научное издание

ВЕСТНИК ТГАСУ № 3 – 2024

ISSN 1607-1859 (для печатной версии) ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций ПИ №77-9483 от 30 июля 2001 г.
Журнал перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-81849 от 24 сентября 2021 г.

Учредитель: ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Редакторы Т.С. Володина, В.Н. Коршунова, Е.А. Кулешова, Переводчик М.В. Воробьева, Дизайнер Е.И. Кардаш.
Технический редактор Н.В. Удлер.

Подписано в печать 21.06.2024. Формат 70×108/16. Гарнитура Таймс.
Уч.-изд. л. 18,57. Усл. печ. л. 22,05. Тираж 200 экз. Заказ № 44.

Дата выхода: 28.06.2024.
Цена: свободная.

Адрес редакции/издателя: 634003, Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822) 65-37-61, e-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
Отпечатано в ООП ТГАСУ, Томск, ул. Партизанская, 15



© Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024

The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

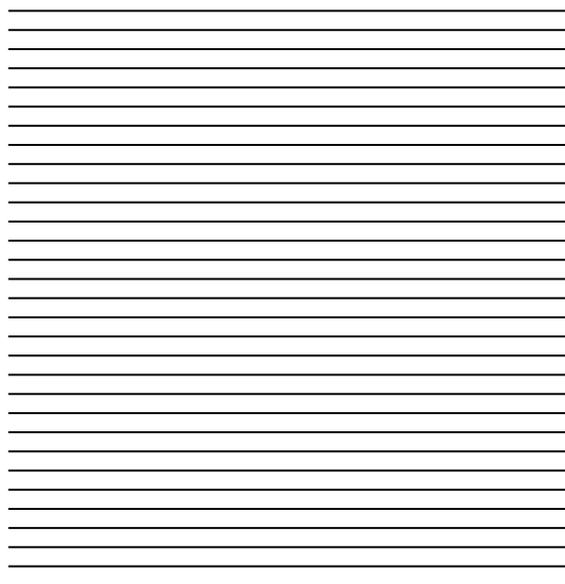
VESTNIK
TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO
ARKHITEKTURNO-STROITEL'NOGO UNIVERSITETA

JOURNAL
OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Volume 26

№ 3 2024
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since April 1999



EDITORIAL STAFF

Lyakhovich L.S., DSc, Professor, RAACS Academician, Structural Mechanics Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; lls@tsuab.ru
Akimov P.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS, Rector, MGSU, Moscow, Russia; pavel.akimov@gmail.com
Belostotskii A.M., DSc, Professor, RAACS Academician, Director General Research Center StaDIO, Moscow, Russia; amb@stadyo.ru
Bekker A.T., DSc, Professor, RAACS Academician, Academic Adviser, Polytechnic Institute of Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia; be-ker.at@dfyu.ru
Bondarenko I.A., DSc, Professor, RAACS Academician, Director Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning, Branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia; niitag@yandex.ru
Chupin V.R., DSc, Professor, Head of Urban Planning and Economy Dept., National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, Russia; chupinvr@ex.istu.edu
Degtyarev V.V., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Hydraulic Engineering, Safety and Ecology Dept., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; ngasu_gts@mail.ru
Efimenko V.N., DSc, Professor, Automobile Roads Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenko_80@mail.ru
Efimenko S.V., DSc, Vice-Rector for Research, TSUAB, Tomsk, Russia; svefimenko@tsuab.ru
Esaulov G.V., DSc, Professor, RAACS Academician, Vice-Rector for Research of Moscow Architectural Institute (State Academy), Moscow, Russia; esaulovgv@raasn.ru
Galyautdinov Z.R., DSc, A/Professor, Head of Reinforced Concrete Construction Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; zgalyautdinov@tsuab.ru
Gnyrya A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; tsp_tgasu@mail.ru
Il'ichev V.A., DSc, Professor, RAACS Academician, RAACS Vice President, Moscow, Russia; ilyichev@raasn.ru
Kapielov S.S., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Laboratory at Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia; kapielov@masterbeton-mb.ru
Kopanitsa N.O., DSc, Professor, Building Materials and Technologies, TSUAB, Tomsk, Russia; kopanitsa@mail.ru
Kudyakov A.I., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; kudyakov@tsuab.ru
Kumpyak O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Reinforced Concrete and Masonry Structures Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; kumpyak@yandex.ru
Lotov V.A., DSc, Professor, Construction Engineering Technology Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; valotov@tpu.ru
Morozov V.I., DSc, Professor, RAACS Corresponding Member, Head of Engineering Constructions Dept., SPSUACE, Saint-Petersburg, Russia; morozov@spbgasu.ru
Orozbekov M.O., DSc, Professor, Rector, Osh State University, Osh, Kyrgyz Republic; oshsu@mail.ru
Ovsyannikov S.N., DSc, Professor, RAACS Adviser, Head of Architecture of Civil and Industrial Buildings Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; ovssn@tsuab.ru
Polyakov E.N., DArts, Professor, Member of the Union of Architects of Russia; Theory and History of Architecture Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; polyakov-en@ya.ru
Skolubovich Yu.L., DSc, Professor, RAACS Correspondent Member, Rector, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia; sjl1964@mail.ru
Sitnikova E.V., DArts, A/Professor, Restoration and Renovation of Architectural Heritage Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; elensi@vtomske.ru
Shubenkov M.V., DArts, Professor, Head of Urban Planning Dept., Moscow Architectural Institute (State Academy), RAACS Vice President, Moscow, Russia; shubenkov@gmail.com
Shubin I.L., DSc, RAACS Corresponding Member, Director Structural Physics Research Institute, RAACS, Moscow, Russia; niisf@niisf.ru
Teltaev B.B., DSc, Professor, Academician, National Academy of Engineering of Kazakhstan and International Academy of Transport, Almaty, Kazakhstan; bagdatbi@yahoo.com
Travush V.I., DSc, Professor, RAACS Vice President, RAACS Academician, Moscow, Russia; travush@mail.ru
Tsantilis L., A/Professor, Environment, Land and Infrastructure Engineering Dept., Polytechnic University of Turin, Turin, Italy; luca.tsantilis@polito.it
Tsvetkov N.A., DSc, Professor, Head of Heat and Gas Supply Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; nac@tsuab.ru
Vlasov V.A., DSc, Professor, RAACS Adviser, Rector, TSUAB, Tomsk, Russia; rector@tsuab.ru
Volokitin G.G., DSc, Professor, Head of Applied Mechanics and Materials Science Dept., TSUAB, Tomsk, Russia; vvg-tomsk@mail.ru
Volokitin O.G., DSc, Professor, RAACS Adviser, Vice-Rector for Academic Affairs, TSUAB, Tomsk, Russia; study@tsuab.ru
Zaichenko N.M., DSc, Professor, Rector, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Russia; mailbox@donnasa.ru

INFORMATION FOR AUTHORS AND READERS

Journal «Journal of Construction and Architecture» is included in the list of the peer reviewed scientific journals and editions published in the Russian Federation. The main results of PhD and DSc theses obtained in construction and architectural field studies should be published in this journal. The journal was approved by the decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Science and Higher Education.

Decision of the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of Russia,
17 June, 2011

The electronic version of the journal is available at www.elibrary.ru; <https://online.bookchamber.ru/book/ru/>; <https://www.rsl.ru/>; <https://www.lib.tomsk.ru/>; <https://www.ebsco.com>; <https://cyberleninka.ru>; www.iprbookshop.ru; <https://vestnik.tsuab.ru>

Scientific Edition
VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARHITEKTURNO-STROITELNOGO UNIVERSITETA
JOURNAL OF CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE № 3 – 2024
Print ISSN 1607-1859 Online ISSN 2310-0044

The journal is registered by the Federal Agency on Press and Mass Communications of the Russian Federation PI N77-9483, 30 July, 2001.
The journal is re-registered by the Federal Supervision Service for Communication, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)
PI N FS77-81849, September 24, 2021.

Founder: Tomsk State University of Architecture and Building

Editors T.S. Volodina, V.N. Korshunova, E.A. Kuleshova. Translator M.V. Vorob'eva. Design: E.I. Kardash. Technical editor N.V. Udler
Passed for printing: 21.06.2024. Paper size: 70×108/16. Typeface: Times New Roman Issue date: 28.06.2024.
Published sheets: 18,57. Conventional printed sheets: 22,05. Print run: 200 copies Price: free.
Order N 44.

Editorial address: 2, Solyanaya Sq., Tomsk, 634003
Phone: +7 (3822) 653-761; E-mail: vestnik_tgasu@tsuab.ru
TSUAB Printing House, 15, Partizanskaya Str., Tomsk, 634003



© Tomsk State University
of Architecture and Building, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

Поляков Е.Н., Полякова О.П. Становление «минималистического» направления в творчестве Ле Корбюзье. Вилла Штейна/де Монзи в Гарше	9
Абдо Исам Ибрахим Али. Исторический опыт климатического архитектурного проектирования в Йемене	25
Пылов П.А., Майтак Р.В., Дягилева А.В., Шалыгина Т.А. Искусственный интеллект в задаче проектирования умного города (на примере Иннополиса).....	37
Подпорина П.С., Смолина О.О. Анализ современных подходов к функциональному зонированию набережных и их предметно-пространственному наполнению.....	47
Югай В.В., Ситникова Е.В. Формирование планировочной структуры г. Тюмени в XVII – первой половине XIX века и деревянная застройка по «образцовым» проектам.....	63
Кутуков А.А., Романова Л.С., Колокольцева Е.Н. Конструктивные особенности перекрытий в общественных зданиях Томска конца XIX – начала XX в. на примере главного корпуса Томского государственного университета	77
Головин С.В. Промышленные территории как ресурс для устойчивого развития российских городов	94
Песков В.М. Становление инженерно-строительного образования в городе Томске в первой трети XX в.	104

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Чесноков А.В., Михайлов В.В. Анализ работы под нагрузкой двухпоясных вантовых ферм	118
Подшивалов И.И. Прочность и устойчивость металлического каркаса на различной стадии работы стали.....	134
Чуржакова Д.В., Филимонов А.А. Оценка влияния снежного покрова в проветриваемом подполье на температурный режим грунтов основания	143
Калдар-оол А.-Х.Б., Сандан Р.Н., Монгуш А.-Х.Х. Постоянные упругости анизотропного материала с цилиндрической анизотропией	158
Пляскин А.С., Матвеев А.В., Бабарыкина А.И., Конышева В.Н. Влияние изгиба арматурных стержней с последующим разгибом на их прочность при растяжении.....	170

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Никифоров С.В. Автоматизированная система мониторинга основания и конструкций фундамента	183
---	-----

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Шестаков Н.И., Ткач Е.В., Хохлова Н.В., Приходько А.Ю. Вторичное применение рекуперационных битумов из отходов рулонных материалов.....	196
Волокитин Г.Г., Устинова М.В., Черемных В.А. Определение влияния различных видов термической обработки на механические свойства древесины сосны с учетом их себестоимости	210

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Джавед Сират, Руденко А.А. Анализ основных факторов, влияющих на выбор организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов	219
---	-----

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Санников Д.Н., Серватинский В.В. Моделирование работы снегопередувающих и снегозащитных ограждений для защиты автомобильных дорог от снежных заносов	233
Каргопольцев В.М. К вопросу вибродиагностики свободных колебаний балок методом Герца.....	242

C O N T E N T S

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Polyakov E.N., Polyakova O.P. Minimalism formation in works of Le Corbusier. Vil-la Stein-de Monzie IN Garches (1925–1928).....	9
Esam Ebrahim Ali Abdo. Historical experience of climate responsive architecture in Yemen.....	25
Pylov P.A., Maitak R.V., Dyagileva A.V., Shalygina T.A. Artificial intelligence in de-sign of smart city (the Innopolis case study)	37
Podporina P.S., Smolina O.O. Modern approaches to functional zoning and space filling of embankments	47
Yugai V.V., Sitnikova E.V. Planning structure in Tyumen in the 17–19th centuries and standard projects of wooden architecture	63
Kutukov A.A., Romanova L.S., Kolokol'tseva E.N. Floor structure in public houses in Tomsk in 19–20th centuries (the Tomsk State University building case studies)	77
Golovin S.V. Former industrial areas for sustainable development of Russian cities	94
Peskov V.M. Formation of civil engineering education in Tomsk	104

BUILDING AND CONSTRUCTION

Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Structural analysis of loaded cable trusses	118
Podshivalov I.I. Strength and stability of metal frame at different stages of steel performance	134
Churzhakova D.V., Filimonov A.A. Snowcover effect in open crawl space on temperature conditions of subgrade soils	143
Kaldar-ool A.-Kh.B., Sandan R.N., Mongush A.-Kh.Kh. Elastic constants of cylindrically anisotropic material	158
Plyaskin A.S., Matveev A.V., Babarykina A.I., Konysheva V.N. Tensile strength of reinforcing bars after bending-unbending	170

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Nikiforov S.V. Automated monitoring system for building foundation structures	183
--	-----

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Shestakov N.I., Tkach E.V., Khokhlova N.V., Prihod'ko A.Yu. Secondary use of recovered bitumen from waste roll materials	196
Volokitin G.G., Ustinova M.V., Cheremnykh V.A. Influence of thermal treatment on mechanical properties of pine wood with regard to prime cost	210

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Jawed Sirat, Rudenko A.A. Main factors affecting choice of organizational structures of construction management.....	219
---	-----

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Sannikov D.N., Servatinskii V.V. Simulation of snow fences for road protection from drifted snow	233
Kartopol'tsev V.M. Free vibration measurement of beams using Hertz's method	242

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 9–24.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 9–24.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-9-24

EDN: AIADZM

СТАНОВЛЕНИЕ «МИНИМАЛИСТИЧЕСКОГО» НАПРАВЛЕНИЯ В ТВОРЧЕСТВЕ ЛЕ КОРБЮЗЬЕ. ВИЛЛА ШТЕЙНА/ДЕ МОНЗИ В ГАРШЕ

Евгений Николаевич Поляков, Ольга Павловна Полякова

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Статья посвящена одному из выдающихся проектов французского архитектора Ш.Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье, 1887–1965), выполненных в традициях минимализма. Вилла Штейна/де Монзи стала «этапным» жилым зданием в его творчестве.

Авторами проанализированы основные архитектурно-дизайнерские концепции Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри, заложенные в решения генерального плана, в планировочные схемы этажей, решения фасадов и интерьеров виллы. В данном проекте он впервые реализовал все пять своих знаменитых принципов минималистической архитектуры: опорный столбчатый каркас, плоская кровля, «свободные» планы и фасады, ленточные крупноформатные окна.

Ключевые слова: стиль минимализм, Ш.-Э. Жаннере-Гри (Ле Корбюзье), вилла Штейна/де Монзи, генеральный план, планы этажей, фасады, интерьеры

Для цитирования: Поляков Е.Н., Полякова О.П. Становление «минималистического» направления в творчестве Ле Корбюзье. Вилла Штейна/де Монзи в Гарше // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-9-24. EDN: AIADZM

ORIGINAL ARTICLE

**MINIMALISM FORMATION IN WORKS OF LE CORBUSIER.
VILLA STEIN-DE MONZIE IN GARCHES (1925–1928)****Evgeny N. Polyakov, Olga P. Polyakova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The article is devoted to one of the outstanding projects of the French architect S.E. Jeanneret-Gris (Le Corbusier, 1887–1965), built in the traditions of minimalism. Villa Stein-de Monzie is a residential building. The paper presents the analysis of the main architectural and design concepts of Charles-Edouard Jeanneret-Gris in the master plan, floor plans, facades and interiors. In this project, Charles-Edouard implemented for the first time all five of his famous principles of minimalist architecture (supporting columnar frame, flat roof, free plans and facades, large-format ribbon windows).

Keywords: minimalism style, Jeanneret-Gris (Le Corbusier), Villa Stein-de-Monzie, master plan, floor plans, facades, interior

For citation: Polyakov E.N., Polyakova O.P. Minimalism formation in works of Le Corbusier. Villa Stein-de Monzie in Garches (1925–1928). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 9–24. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-9-24. EDN: AIADZM

В 1920-х гг. Шарлю-Эдуарду Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) удалось реализовать несколько проектов жилых особняков (вилл), которые сделали его одним из лидеров европейского авангарда. Оригинальные, неожиданные для своего времени постройки с крупноформатными ленточными окнами и гладкими белыми стенами выполнены в духе минимализма. В основном это частные особняки в окрестностях Парижа. «Эти виллы были настолько необычны и своеобразны (для того времени), что парижане, бывало, собирались перед ними, словно перед каким-то удивительным аттракционом – таких домов они еще не видывали...» [1]. Последние по времени и самые известные из этих построек – виллы Штейн/де Монзи в Гарше и Савой в Пуасси. Настоящая статья посвящена первой из этих вилл.

Проект виллы в Гарше близ Парижа Ле Корбюзье создал в 1926 г. Она стала одной из самых значительных его работ в области жилищного строительства (рис. 1).

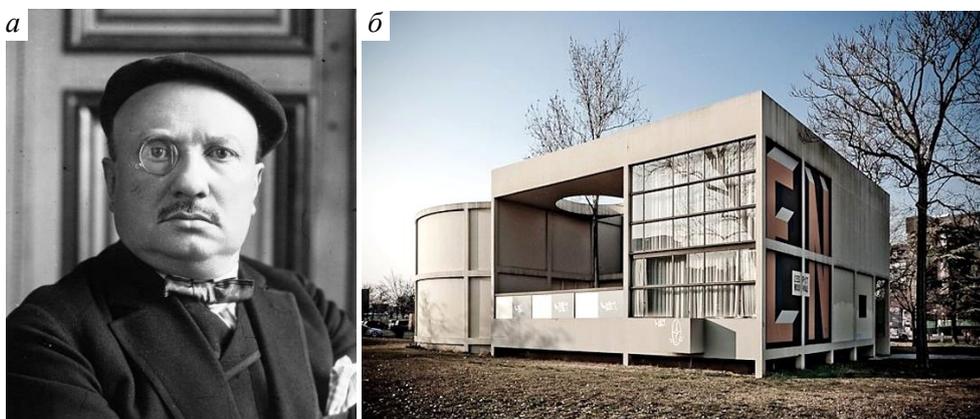
Уникальный дом был построен по заказу семейства Штейн. Впрочем, существует версия, что в роли заказчика данной виллы выступил Анатолий де Монзи (1876–1947) – французский ученый-энциклопедист (рис. 2, а). В 1925 г. в течение непродолжительного времени он занимал пост министра образования и изящных искусств, был большим поклонником творчества Ле Корбюзье. Благодаря именно его поддержке Шарль-Эдуард смог возвести павильон «Эспри Нуво» на Всемирной выставке в Париже (1925 г.) (рис. 2, б).

Изначально вилла принадлежала коллекционерам картин Майклу и Саре Штейн – супружеской паре, приехавшей во Францию из Сан-Франциско (США), а также их подруге Габриэль Колако-Осорио де Монзи – бывшей супруге министра А. де Монзи. Заказчики уже проявили себя в роли активных

покровителей современного искусства и архитектуры. Супруги Штейн предпочитали вкладывать деньги в картины художников-импрессионистов. Они были также убежденными сторонниками реформаторского движения и спиритуализма. Сара Штейн (Стайн) во многом разделяла взгляды Ле Корбюзье на современное искусство, на важность разработок новых промышленных технологий для современного общества. Много внимания она также уделяла освоению новейших методов оздоровления и физическим упражнениям.



*Рис. 1. Вилла в Гарше (Villa Stein-de-Monzie)¹
Fig. 1. Villa Stein-de-Monzie*



*Рис. 2. Анатолий де Монзи (а)²; павильон «Эспри Нуво» (L'Esprit Nouveau) на Всемирной выставке в Париже (б)³
Fig. 2. Anatole de Monzie (a); L'Esprit Nouveau pavilion at the Universal Exhibition in Paris (b)*

¹ URL: <https://architecturalidea.com/villa-v-garshe-villa-stein-de-monzie/?ysclid=lwn1smwj8w583909950>

² URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/19/Anatole_de_Monzie_1925.jpg

³ URL: <https://api.architectuul.org/media/516d9172-2290-4eaf-b477-41346d7b5f76/1312x.jpg>

За несколько лет до встречи с Ле Корбюзье подруги прочитали книгу «Христианская наука», написанную в 426 г. древнеримским философом-богословом Аврелием Августином Иппонийским (354–430). Религиозные и душевные узы побудили их создать единую семью и жить в одном доме.

С Шарлем-Эдуардом заказчицы познакомились, скорее всего, через Анри Эмиля Бенуа Матисса (1859–1954), картины которого они в основном и покупали. Матисс представил им Ле Корбюзье как гениального архитектора. Дело в том, что Анри уже побывал в особняке Рауля Ла Роша, богатого бизнесмена из Швейцарии. Это здание привело его в восторг. К тому же Рауль также был коллекционером художественных произведений, выполненных в стиле кубизм. Об этом направлении было написано в статье [2].

Уникальная организация домашнего хозяйства клиентов в сочетании с их приверженностью современной архитектуре, искусству и религии помогла Ле Корбюзье разработать принципиально новый концептуальный подход к формированию жилого пространства этого здания. Вилла Штейна стала самым дорогим и роскошным жилым особняком, который архитектор запроектировал в период между Первой и Второй мировыми войнами. Вместе с садом и прилегающими постройками, которые также были выполнены по проектам Ле Корбюзье, она обошлась заказчикам в полтора миллиона франков (в ценах начала XX столетия). Все комнаты виллы были общими для обеих семей. Габриэль де Монзи и её дочь заняли нижнюю часть дома, а супруги Штейн – верхнюю, оснащенную просторной террасой.

Вилла Штейн/де Монзи, прозванная Les Terrasses («Террасы»), расположена в Вокрессоне (бывш. Гарше) – районе богатых особняков под Парижем. Ле Корбюзье считал её «этапной» в своем творчестве. Действительно, эта постройка принадлежит к наиболее значимым его созданиям довоенного периода, выполненным в традициях модернизма. Со всех сторон вилла была окружена садами, что видно на генеральном плане участка (рис. 3).

В этой вилле Ле Корбюзье реализовал все свои пять «основных принципов» современной архитектуры. Рассмотрим их по порядку.

Начнем с планировочной структуры виллы, следуя главной концептуальной установке функционализма «всякий дом растёт изнутри наружу». Прямоугольный план здания имеет довольно замысловатую внутреннюю структуру. Это свидетельствует о внимательном изучении и учёте архитектором пожеланий своих неординарных заказчиц. Он принципиально отошёл от простых и логичных планов времен барокко и модерна. Планировочные схемы этажей виллы Штейн/де Монзи стали намного сложнее, поскольку бытовые потребности горожан в начале XX столетия стали более разнообразными.

На нижнем уровне виллы размещены холл, гараж, ремонтная мастерская и жилые апартаменты прислуги. Опорами зданию служат 16 стройных железобетонных колонн круглого сечения: «Вилла в Гарше – блистательное проявление современной эстетики! Если собрать несущие столбы этого дома в один пучок, то они образуют железобетонный пилон сечением 80×110 см...» [3] (рис. 4).

В период проектирования виллы Штейн/де Монзи Ле Корбюзье был уже весьма популярным и преуспевающим зодчим. Он получал заказы от богатых клиентов, поэтому имел собственный автомобиль – двухместный Voisin-C12.

В одном из документальных фильмов 1930-х гг. («Архитектура сегодня») он подъезжает в этом автомобиле к подъезду рассматриваемой здесь виллы.

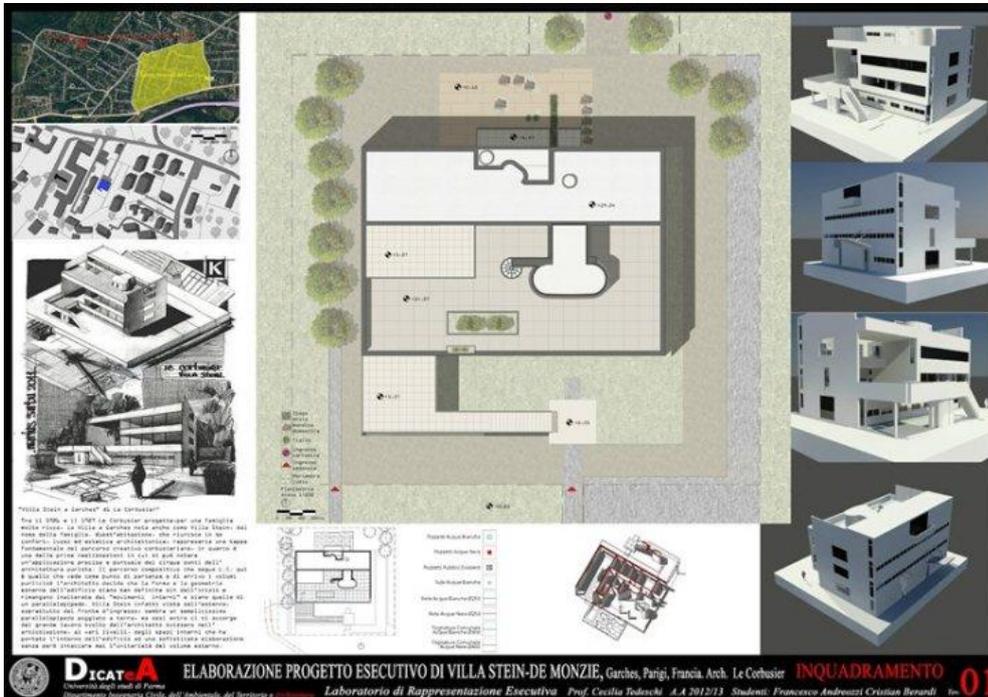


Рис. 3. Генеральный план участка⁴
Fig. 3. Master plan of the site

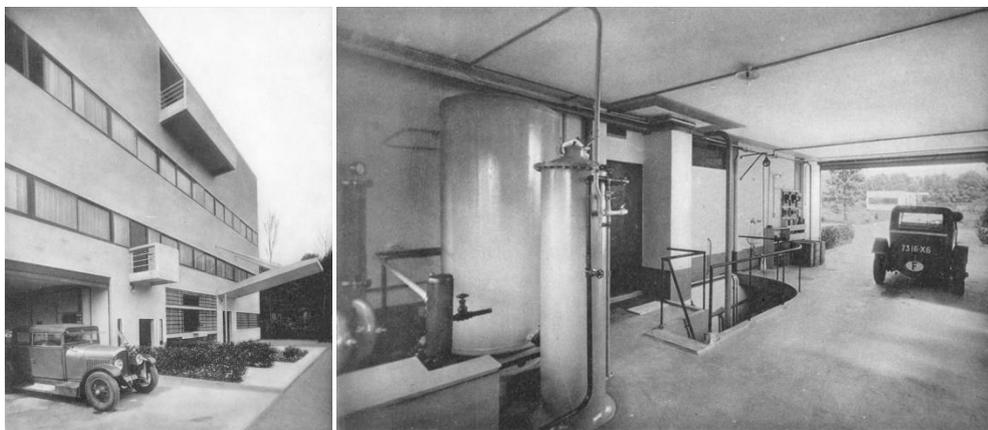


Рис. 4. Нижний уровень виллы Штейна, оснащенный автостоянкой. Фотографии начала XX в.⁵
Fig. 4. Lower level of the Stein Villa equipped with a car park. Photos of the 20th century

⁴ URL: <https://i.pinimg.com/originals/e8/9d/d4/e89dd4f7d5767c653370ec915daa269e.jpg>

⁵ URL: https://corbusier.totalarch.com/stein_de_monzie?ysclid=lwn097j68g923380008; <https://i.pinimg.com/originals/7a/7f/52/7a7f52c31daefd258955d5acbf0cd81.jpg>

Роль междуэтажных перекрытий виллы выполняют три тонкие железобетонные плиты, поддерживаемые колоннами круглого сечения. Колонны, образующие изящную регулярную решетку, визуально изолированы друг от друга. Предельно упрощенная и облегченная конструктивная система позволила максимально реализовать в интерьерах второго и третьего этажей принципы «свободной» планировки.

Центр второго этажа занимает открытая со всех сторон общая комната. В её северо-западном углу размещена библиотека, в северо-восточном – кухня, в юго-восточном – столовая. Юго-западную часть второго этажа занимает небольшая терраса (рис. 5).

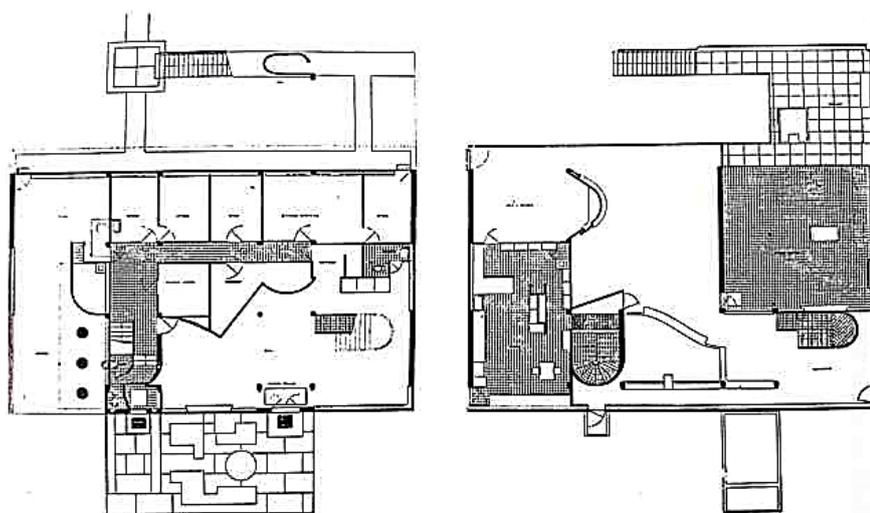


Рис. 5. План 1-го этажа (слева); план 2-го этажа (справа). Северная сторона фасада здания – снизу⁶

Fig. 5. The 1st floor plan (left); the 2nd floor plan (right); north side of the building facade (below)

Внутри виллы размещены две лестницы. Первая поднимается из холла в библиотеку, а вторая ведёт из прохода близ гаража к кухне и выше.

На третьем этаже расположены спальные помещения, гардеробные и ванные комнаты. Там же находится еще одна терраса, открытая на запад и закрытая с трех остальных сторон. Южная часть третьего этажа представляет собой террасу с садом. В центре ее сооружена эллиптическая в плане башенка. В северной части этажа размещены спальни для прислуги и гостей, обращенные своими окнами на южную террасу. Северная наружная стена виллы на третьем этаже лишена окон (рис. 6).

Сад на кровле третьего этажа и терраса с лестницей на первом этаже визуально расширили внешнее пространство виллы и обеспечили гармоничную связь ее внутреннего пространства с окружающим ландшафтом. Ленточные

⁶ URL: <https://visuallexicon.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/320.jpg?w=768>

окна, расположенные по периметру здания, пропускают максимальное количество прямого и отраженного света в каждую комнату.

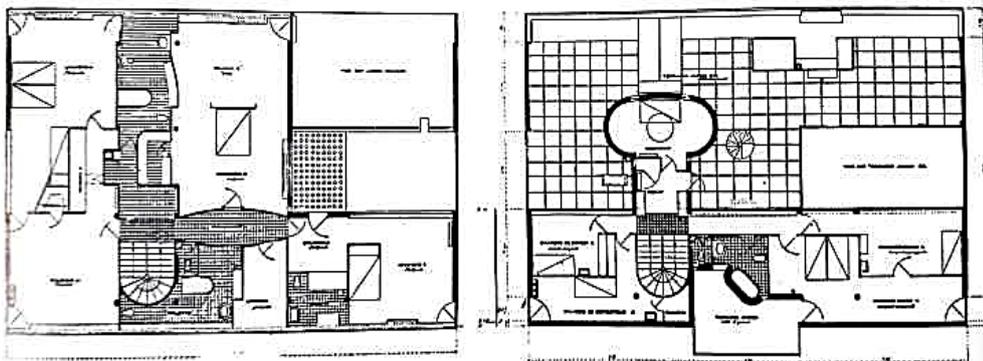


Рис. 6. План 3-го этажа (слева); план плоской крыши (справа). Северная сторона фасада здания – снизу⁷

Fig. 6. The 3rd floor plan (left); the flat roof plan (right); north side of the building facade (below)

У виллы Штейн/де Монзи весьма своеобразные фасады – предельно лаконичные и в то же время не совсем обычные. Судя по всему, эта вилла была уникальной постройкой для своего времени. Она представляет собой здание, сочетающее на своём фасаде инновационные для того времени строительные материалы – железобетон и стекло. Наружные стены, изготовленные из этих материалов, лишены несущих функций. Внутренние же стены в основном служат перегородками между комнатами (рис. 7).



Рис. 7. Вилла Штейн/де Монзи в Гарше: макет (слева)⁸; продольный разрез виллы «Террасы» (справа)⁹

Fig. 7. Villa Stein-de Monzie in Garché: layout (left); longitudinal view of the Villa Terraces (right)

⁷ URL: <https://visuallexicon.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/320.jpg?w=768>

⁸ URL: <https://ngasanova.livejournal.com/2008167.html>

⁹ URL: <https://cdn.archilovers.com/projects/a429f3d0b823446bab4938a021515141.jpg>

На фасаде, выходящем на север, навесные стены представляют собой чередующиеся полосы железобетона и стекла. На южной стороне оконные проемы сравнительно широкие, а на северной – более узкие (рис. 8).

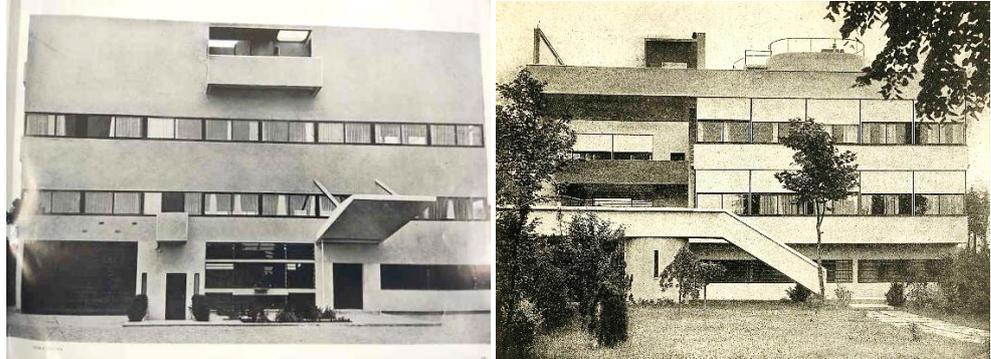


Рис. 8. Северный (слева) и южный (справа) фасады виллы. Фотографии 1929 г.¹⁰
Fig. 8. North (left) and south (right) facades of the villa, 1929

Вилла Штейн является культовым достижением модернистского периода в творчестве Ле Корбюзье. В 1919 г. архитектор так охарактеризовал особенности пуристического стиля в авангардном журнале L'Esprit Nouveau («Новый дух»): «Произведения делаются читаемыми, простыми, лишенными формы, организованными в упорядоченные конструкции, порождающие гармонию...» [3].

Все четыре фасада виллы имеют свои стилевые особенности и отличаются друг от друга. Особенно приятное впечатление производит южный фасад с его широкими лентами окон и лестницей, поднимающейся на открытую террасу. Удивительно, насколько диагональ лестничного марша оживила этот фасад, вписанный в причудливую сетку из горизонталей и вертикалей (рис. 9).



Рис. 9. Макет виллы Штейн (южный фасад) (слева)¹¹; фрагмент южного фасада (справа)¹²
Fig. 9. Layout of Villa Stein (south facade) (left); fragment of the south facade (right)

¹⁰ URL: <https://tehne.com/assets/i/upload/event/sa-1929-05-026-ill-1.jpg>; <http://okna-de.ru/upload/media-library/d8b/d8b8e2fdeab7944401967e436632b495.jpg>

¹¹ URL: <https://i.pinimg.com/originals/e7/4f/18/e74f1806ed9d7e9deb0909b794d2b8f2.jpg>

¹² URL: <https://cdn.thespaces.com/wp-content/uploads/2020/01/Appartement-dans-la-villa-Stein-15.jpg>

Северный фасад с его узкими ленточными окнами и крупноформатными глухими плоскостями стен не столь привлекателен. Чрезмерно широкая плоскость ограждения в верхней части фасада визуальнo утяжеляет его. Не очень красив и навес над входом (рис. 10).



Рис. 10. Макет виллы Штейн/Северный фасад (видовые точки)¹³
Fig. 10. Layout of Villa Stein-de-Monzie. North facade

Вилла имеет хорошо продуманную систему естественного освещения. Как и в особняках А. Озанфана и Р. Ла Роша, интерьеры виллы Штейна были предназначены для размещения произведений современного искусства. Поэтому в верхней части «экспозиционных» комнат предусмотрены широкие оконные ниши, а в нижней – простенки, в которых висели картины и были установлены небольшие скульптуры.

Одно из главных украшений виллы Штейн – изумительные террасы, открытые во внутренний (южный) двор усадьбы. Отсюда возникло ещё одно название этого здания – «Террасы». Его открытые, композиционно связанные друг с другом ленточные окна, бетонные площадки и металлические лестницы своими формами напоминают океанские лайнеры с их открытыми палубами, лестницами и мостиками. Подобные аналоги всегда были для Шарля-Эдуарда образцами рациональной организации и источником его архитектурных идей (рис. 11).

Дю Паскье, один из молодых сотрудников Ле Корбюзье, посетил строительную площадку уже на стадии завершения рассматриваемой здесь виллы. Он посвятил ей следующие строки: «Что за чудо эта верхняя терраса! Там испытываешь такое наслаждение, что поневоле оттягиваешь момент спуска. <...> Сегодня после обеда я снова побывал в Гарше вместе с господином и госпожой Штейн и госпожой де Монзи. Над террасой развевались французский и американский флаги. <...> Лестница, которая ведет наверх к обзорной площадке, уже установлена. Мадам де Монзи уверяет, что вряд ли решится

¹³ URL: http://samlib.ru/r/rzhewishewskij_j_n/villastain.shtml

когда-либо подняться по ней. Поговаривают, что дом будет называться «А заберись-ка повыше!..» [4] (рис. 12, 13).



Рис. 11. Океанские лайнеры начала XX столетия¹⁴
Fig. 11. Ocean liners of the early 20th century



Рис. 12. «Капитанский мостик» виллы Штейн. Современное состояние, видовые точки¹⁵
Fig. 12. 'Captain's Bridge' in the Villa Stein

Утилитарное назначение её террас – спортивные разминки и солнечные ванны. Отдых и физические занятия на открытом воздухе в начале прошлого столетия были весьма популярны в кругах просвещенной элиты. И были на повестке дня у архитекторов того времени. А загорать на солнце, сняв верхнюю одежду, только входило в моду. Кроме того, террасы служили местом проведения семейных вечеринок (*англ. party*) для хозяев виллы и их друзей. Эту виллу посещали многие известные люди того времени – бизнесмены, дипломаты и политики (А. де Монзи и др.), архитекторы и художники (П. Жан-нере, А. Матисс и др.), писатели и журналисты (Г. Стейн, В. Кук и др.). Неко-

¹⁴ URL: <https://pp.userapi.com/c629326/v629326847/3ad5/zDiTS0e0QU4.jpg>

¹⁵ URL: https://corbusier.livejournal.com/32554.html?ysclid=lwmzp_5je1m877616830

торые из них стали деловыми партнерами и заказчиками Шарля-Эдуарда. Да и сам Ле Корбюзье вместе с прелестной супругой Ивон Гали часто приезжал сюда на своем двухместном автомобиле.

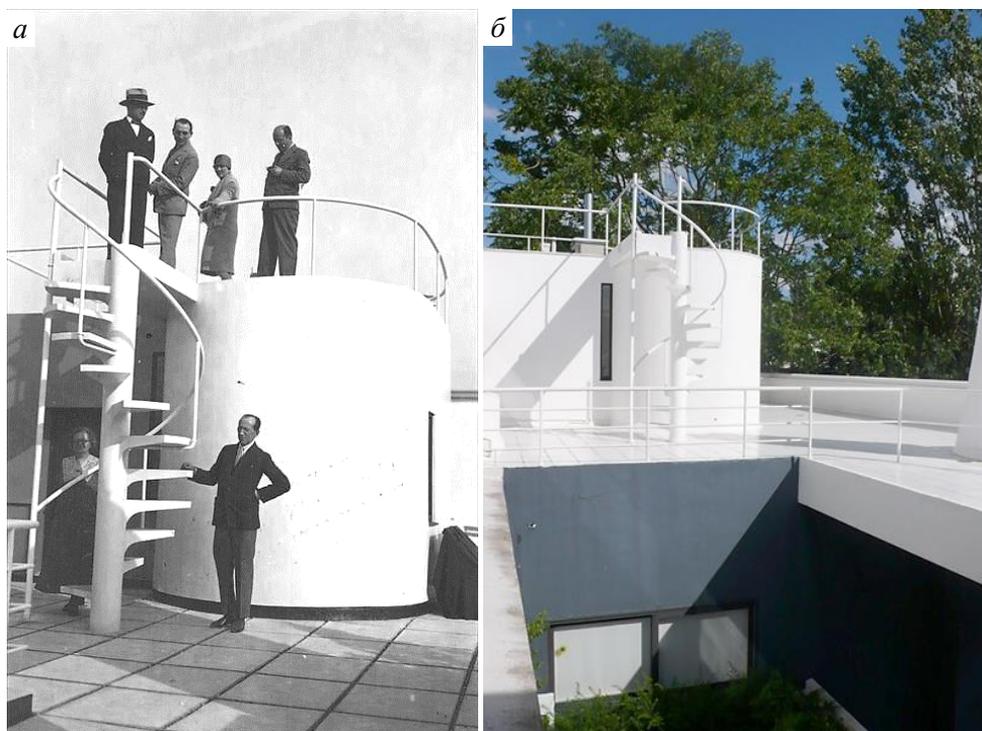


Рис. 13. «Капитанский мостик» виллы Штейн (фото 1920-х гг.):

a – слева внизу у лестницы – Ле Корбюзье и мадам де Монзи; наверху справа – Пьер Жаннерет¹⁶; *б* – видовая точка «мостика»¹⁷

Fig. 13. 'Captain's Bridge' in the Villa Stein (1920s):

a – Le Corbusier and Madame de Monzie, Pierre Jeanneret¹⁶; *b* – Captain's Bridge¹⁷

Вилла Штейн/де Монзи, безусловно, – один из наиболее интересных проектов Ле Корбюзье. И один из самых дорогих. Однако богатство этой виллы, пожалуй, не в роскоши декора или его внутренней обстановки, а в необычной пространственной структуре, которая сама по себе создает впечатление роскоши. Ее предельно лаконичным в своей геометрии фасадам присуща утонченная, недоступная взорам дилетантов пластика. Приглашенного вскоре после окончания строительства дома Штейна Анри Матисса Ле Корбюзье спросил: «Каково Ваше мнение об этом доме?» Взволнованный Матисс воскликнул: «Я буквально потрясен!» Это было в 1927 г.

¹⁶ URL: <https://www.fondationlecorbusier.fr/wp-content/uploads/2022/04/villa-stein-de-monzie-fle-adagp-4.jpg>

¹⁷ URL: <https://corbusier.livejournal.com/32554.html?ysclid=lwmzp5je1m877616830>

Как в построении прямоугольного плана, так и в определении композиции главных фасадов применены комбинации классической симметрии с пропорциями золотого сечения. Это вполне возможно, поскольку Ле Корбюзье занимался композиционным моделированием еще в период проектирования Турецкой виллы в Ла-Шо-де-Фоне (1916 г.) [5].

В основу пропорций фасадов, вероятно, были положены принципы классической геометрии. При создании проекта этой виллы Ле Корбюзье, по мнению целого ряда ученых, вдохновлялся классической моделью виллы Фоскари, построенной в XVI в. итальянским архитектором Андреа Палладио (1508–1580) (рис. 14).



Рис. 14. Фасады загородной виллы Николло и Альвизе Фоскари (Мальконтента, «Недовольная», 1559–1560 гг.)¹⁸

Fig. 14. Villas of Nicollo and Alvise Foscari (Malcontenta, 'Unhappy', 1559–1560)

Британский историк архитектуры Колин Фредерик Роу (1920–1999) в своем эссе «Математика идеальной виллы» (1947 г.) сравнил модульную схему фасадов виллы Штейн/де Монзи с геометрической сеткой плана виллы Фоскари. Он обнаружил, что в пропорциональные системы обеих вилл были заложены модульные блоки примерно одного размера: 8 единиц в длину, 5,5 – в ширину, 5 – в высоту. При этом Роу отметил различные подходы обоих мастеров к математическому пропорционированию. По его мнению, А. Палладио, по всей видимости, был весьма «озабочен логическим расположением догматически принятых мотивов», в то время как Ле Корбюзье «более свободен в своих творческих поисках и противопоставляет новую схему старой...» (Colin Rowe. *The Mathematics of the Ideal Villa*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1976. 240 p.) (рис. 15, 16).

Иную точку зрения высказал профессор МАРХИ, доктор исторических наук Олег Александрович Швидковский: «Методы пропорционирования прошлого, основанные исключительно на математике, не удовлетворяли архитектора тем, что они были слишком отвлечены, абстрактны по отношению к человеку и создавали сетку пропорций, трудно сопоставимую с обычными размера-

¹⁸ URL: https://zimamagazine.com/wp-content/uploads/2020/06/Villa_Foscari_20070710-1.jpg; https://live.staticflickr.com/3789/11430336796_cf6c63c0de_b.jpg

ми его тела. Взяв за исходные величины средние размеры человеческой фигуры, Корбюзье построил на базе золотого сечения геометрически возрастающий ряд величин, применимый ко всей окружающей человека среде – от предметов быта до элементов планировки городов. Это позволило ему соединить в «Модулоре» давно доказанные объективные свойства золотого сечения с человеческим началом и сделать свою систему действительно универсальной...» [3] (рис. 16).



Рис. 15. Южный фасад виллы «Террасы» в Гарше, видовая точка (слева); пропорциональные системы южного (вверху) и северного (внизу) фасадов (справа)¹⁹
 Fig. 15. South façade of the Villa Terraces in Garché (left); proportional systems of the south (top) and north (bottom) façades (right)

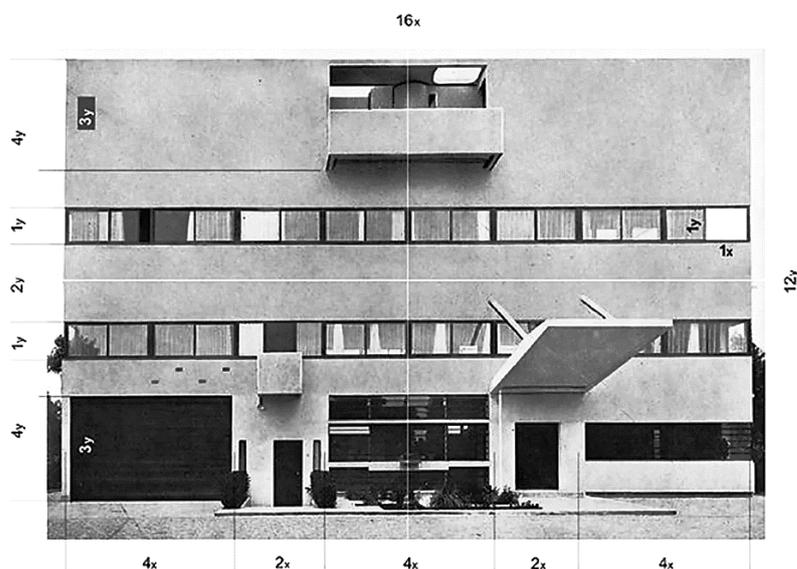


Рис. 16. Система пропорций северного (главного) фасада виллы Штейна в Гарше (1925–1928 гг.)²⁰
 Fig. 16. System of proportions of the northern (main) facade of the Stein villa in Garsch (1925–1928)

¹⁹ URL: <https://i.pining.com/originals/ba/d4/b5/bad4b57c63b73f6b8da785bc1468e948.jpg>

²⁰ URL: <https://archi-monarch.com/wp-content/uploads/2022/08/REGULATING-LINES-THREE.webp>

Все это позволило Шарлю-Эдуарду максимально расширить возможности интерьерного дизайна данной виллы. «Ле Корбюзье умел отлично передавать ощущение света и пространства; это качество как бы выявляло черты его характера. С тринадцатилетнего возраста он носил очки, поэтому привык рассматривать рисуемые предметы с близких расстояний, он как бы всматривался в то, “как они сделаны”. Поэтому часто выполненные им контурные рисунки передавали характер объема изображенных вещей. На картинах Ле Корбюзье вы видите тщательно прорисованные предметы, рассматриваемые в фас, но в то же время они как бы имеют обратную сторону, которая выявлена в абрисе изображенных им вещей. Это своеобразная архитектурность изображения. Черты его характера проявлялись также и в его живописных работах; предметы на картинах имели безукоризненные и точные план и разрез, являющиеся основой архитектурного творчества...» [3] (рис. 17, 18).

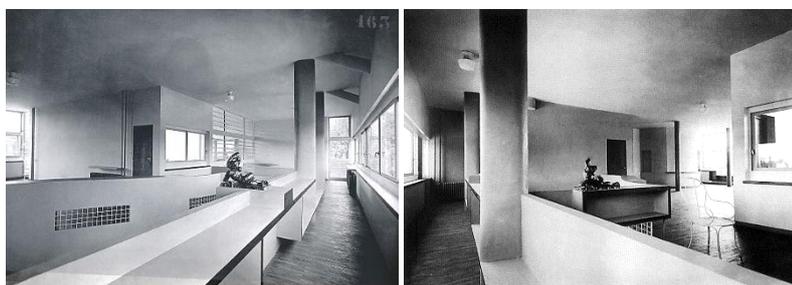


Рис. 17. Гостиная комната на третьем этаже. Видовые точки²¹
Fig. 17. Living room on the third floor



Рис. 18. Интерьеры виллы Штейн. Мебель, выполненная в стиле «а-ля Корбю»²²
Fig. 18. Interiors of Villa Stein. Furniture made in the ‘à la Corbut’ style

²¹ URL: https://corbusier.totalarch.com/stein_de_monzie?ysclid=lwn097j68g923380008; <https://i.pinimg.com/originals/04/8e/97/048e9719344d12ff380378156ae7cbe8.jpg>

²² URL: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/villastain.shtml

В 1936 г. супруги Штейн вернулись в США. Принадлежавшую им часть дома (верхние этажи с террасой) выкупил богатый бельгиец Стеен (Steen). Его очень удивило и даже возмутило то, что это необычное здание привлекало внимание случайных прохожих и зевак. «Вскоре после того, как он въехал в свои апартаменты, в кабинете Ле Корбюзье прозвучал телефонный звонок: “Скажите, уважаемый, в чем дело? Что это за дом я купил? Каждый выходной вокруг него собираются какие-то люди, располагаются на моей лужайке и удивленно на него таращатся...”» [6]. Позднее Ле Корбюзье предложил капризному клиенту украсить холл своей виллы мозаичным панно, выполненным в стилистических традициях пуризма. Однако тот воскликнул: «Никогда! И слышать не желаю! Я хочу спокойно спать ночью!...» [6].

Сам же Ле Корбюзье считал виллу Штейн/де Монзи «этапной» в своем творчестве. Действительно, она принадлежит к его наиболее представительным творениям довоенного периода («героической» эпохи пуризма). В 1975 г. эта уникальная постройка была включена в список исторических памятников Франции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Ржепিশевский Ю.* Кто такой Ле Корбюзье? (Who was Le Corbusier?) // Lib.ru: Журнал «Самиздат». URL: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/kto_takoj_le_korbusie.shtml
2. *Поляков Е.Н., Полякова О.П.* «Кубическое» направление в творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 6. С. 9–28.
3. *Швидковский О.А.* Ле Корбюзье. Творческий путь // elima.ru. – Аспекты строительного проектирования. – URL: <https://elima.ru/articles/?id=800>
4. *Поляков Е.Н., Полякова О.П.* Швейцарский период (1887–1917) в жизни и творчестве Шарля-Эдуарда Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 9–20.
5. *Вилла в Гарше (Villa Stein-de-Monzie)* // Архитектурные идеи. URL: <https://architecturalidea.com/villa-v-garshe-villa-stein-de-monzie/>
6. *Ржепিশевский Ю.* Шедевр элегантной простоты (Villa Stein by Le Corbusier) // Lib.ru: Журнал «Самиздат». URL: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/villastain.shtml

REFERENCES

1. *Rzhepishevsky Yu.* Who is Le Corbusier? (Who was Le Corbusier?). Access conditions: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/kto_takoj_le_korbusie.shtml (In Russian)
2. *Polyakov E.N., Polyakova O.P.* Cubism in creative activity of Le Corbusier. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25 (6): 9–28. (In Russian)
3. Le Corbusier. The creative path. Available: <https://elima.ru/articles/?id=800> (In Russian)
4. *Polyakov E.N., Polyakova O.P.* Life in Switzerland of Charles-Édouard Jeanneret known as Le Corbusier]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (3): 9–20. (In Russian)
5. Villa in Garsh (Villa Stein-de-Monzie). Available: <https://architecturalidea.com/villa-v-garshe-villa-stein-de-monzie/> (In Russian)
6. *Rzhepishevsky Yu.* A masterpiece of elegant simplicity (Villa Stein by Le Corbusier). Available: http://samlib.ru/r/rzhepishewskij_j_n/villastain.shtml (In Russian)

Сведения об авторах

Поляков Евгений Николаевич, докт. искусствоведения, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, polyakov.en@yandex.ru

Полякова Ольга Павловна, канд. экон. наук, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Authors Details

Evgeny N. Polyakov, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, polyakov.en@yandex.ru

Olga P. Polyakova, PhD, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.05.2024
Одобрена после рецензирования 22.05.2024
Принята к публикации 23.05.2024

Submitted for publication 06.05.2024
Approved after review 22.05.2024
Accepted for publication 23.05.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 25–36.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 25–36.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 728

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-25-36

EDN: AZWZIL

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ КЛИМАТИЧЕСКОГО АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ЙЕМЕНЕ

Исам Ибрахим Али Абдо

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье приводится исторический опыт климатического (энергоэффективного) архитектурного проектирования в Йемене. Рассматривается актуальность энергоэффективных жилых домов для регионов с жарким и сухим климатом и для всех регионов в целом. Представлен анализ йеменской архитектуры по регионам и архитектурно-планировочных решений жилых зданий в зависимости от топографии регионов. Описаны климатические решения проектирования жилых зданий в Йемене.

Целью исследования является анализ исторического опыта климатической архитектуры жилых зданий, который помогает в поиске современных методов создания комфортного жилья и позволяет экономить энергопотребление, увеличивать сроки эксплуатации здания, а также сокращает плату за электричество.

Выводы. Показано, что обращение к приемам традиционной архитектуры Йемена в современном строительстве может способствовать не только созданию комфортного жилья, но и защите окружающей среды от ущерба, полученного в результате производства электроэнергии, который приводит к истощению энергетических запасов, ослаблению экономики государств и невозможности использования этих ресурсов для последующих поколений.

Ключевые слова: архитектура Йемена, архитектурный стиль, региональная классификация архитектуры Йемена, типология йеменской архитектуры, климатические решения

Для цитирования: Абдо Исам Ибрахим Али. Исторический опыт климатического архитектурного проектирования в Йемене // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 25–36. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-25-36. EDN: AZWZIL

ORIGINAL ARTICLE

HISTORICAL EXPERIENCE OF CLIMATE RESPONSIVE ARCHITECTURE IN YEMEN

Esam Ebrahim Ali Abdo

Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Abstract. The article explores the historical experience of climate responsive architecture in Yemen. The relevance of energy-efficient residential buildings for hot-dry regions in particular, and for all regions in general, is discussed in the article. Regional classification of architec-

ture of Yemen is analyzed. Architectural planning solutions are discussed for residential buildings in Yemen based on the topography. The article delves into the climatic responsive design solutions for residential buildings in various regions.

Purpose: The aim of this article is to analyze the historical experience of the architecture of Yemen for climate responsive (energy-efficient) residential buildings.

Methodology: Analysis of the historical experience of energy-efficient architecture to identify suitable and modern methods for construction of energy-efficient residential buildings.

Research findings: Based on the analysis, considered in the creation of comfortable housing and saving energy consumption in various areas throughout its lifespan and at the end of each month when residents settle their electricity bills.

Practical implications: The proposed methods provide not only comfortable housing, but also preserve and protect the environment from damage caused by energy extraction, which, in turn, depletes energy resources, weakens state economy, and hinders the utilization of these resources for future generations.

Keywords: architecture of Yemen, regional classification, typology, climatic solutions, traditional design, passive design

For citation: Esam Ebrahim Ali Abdo. Historical experience of climate responsive architecture in Yemen. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 25–36. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-25-36. EDN: AZWZIL

Введение

Традиционная архитектура является природным и наследственным фундаментом для обновления местной архитектуры. На основе этого понятия сформулирована цель настоящего исследования, а именно изучение возможности использования технологических приемов в современной архитектуре в соответствии с традиционной архитектурой, обеспечивающей комфортную внутреннюю среду. Исследование направлено на изучение традиционной архитектуры и ее архитектурных элементов, строительных материалов и методов реализации, которые сыграли важную роль в обеспечении внутренней среды, совместимой с физиологическими и психологическими потребностями человека благодаря использованию природной энергии, которая, в свою очередь, обеспечивает рациональное энергопотребление.

Традиционная архитектура в регионах с жарким и сухим климатом обеспечивает защиту от экстремальных погодных факторов, отражает преобладание природных, культурных и социальных функций окружающей среды, а также экологических условий, в которых она возникла. В районах с жарким и сухим климатом планировка зданий интегрирована в городскую среду, и за счет этого создаются затененные пространства. Внутренние дворы используются для обеспечения конфиденциальности и защиты от внешних угроз и суровых условий. Толстые стены возводятся из материалов с высокой тепловой мощностью для контроля колебаний температуры.

Целью исследования является анализ исторического опыта йеменского климатического (энергоэффективного) архитектурного проектирования жилых зданий.

Климатическое архитектурное проектирование зданий – это процесс проектирования с учетом окружающей среды и климатических условий, а также сокращения потребления энергии, материалов и ресурсов с целью наименьшего воздействия на окружающую среду и обеспечения гармонии с природой.

Исторический опыт климатического архитектурного проектирования подразумевает опыт и методы проектирования, которые используются при возведении жилых зданий в Йемене, в зависимости от географии регионов, климатических условий, материалов и элементов для создания комфортного жизненного пространства с рациональным энергопотреблением и сохранением окружающей среды.

Региональная классификация йеменской архитектуры

Архитектура Йемена в целом и традиционная архитектура в частности представляют собой памятник культуры, отражающий уникальность и идентичность строительства и свидетельствуют о высоком уровне йеменской архитектуры. Творчество архитекторов не ограничивается созданием групп повторяющихся зданий, оно включает и разработку различных методов строительства, которые применяются сотни лет. Архитекторы используют имеющиеся строительные материалы, интегрируя в свои проекты форму и функцию. Организация их строительства элементарно проста и эффективна. Поэтому энергоэффективные и креативные здания строятся в соответствии с окружающей средой, создавая различные ландшафты на равнинах, горах, побережьях и в пустынях территориях. Территория Йемена богата природными ресурсами и различными материалами, используемыми в строительстве (рис. 1) [1]. Архитектура Йемена зависит от топографии и строительных материалов регионов [2, 3].



Рис. 1. Топография территории Йемена

Fig. 1. Topography of Yemen territory

Архитектурные решения жилых зданий в зависимости от региональной топографии

В этом разделе приведен анализ и изучение архитектурных решений жилых зданий, а также климатических решений для каждого района. Территорию Йемена можно разделить на следующие регионы [4]: 1) Западное нагорье, 2) Прибрежная равнина, 3) Восточное плато, 4) район полупустыни.

Западное нагорье

Этот район расположен в западной части Йемена, между прибрежным нагорьем на западе и котловиной на востоке. Западное нагорье простирается от крайнего севера до крайнего юга, а его высота колеблется от 1500 до 3000 м. Территория характеризуется мягким климатом с дождливым летом. Максимальная среднемесячная температура достигает 30 °С в июне, а в остальные месяцы года температура колеблется в пределах 22–29 °С. Минимальная среднемесячная температура находится в диапазоне от 0 °С зимой до 17 °С летом. Годовая норма осадков – в пределах 40–25 мм/год [4]. Основными строительными материалами в этом регионе являются камень и кирпич (рис. 2).



Рис. 2. Жилая застройка в Западном нагорье
Fig. 2. Housing in the Western Highlands

Архитектурно-планировочные решения жилых зданий Западного нагорья

При проектировании традиционного жилого здания внимание уделяется расположению главного входа, который должен соответствовать йеменским традициям и обычаям. Вход в другие помещения должен пролегать через коридор для обеспечения членам семьи конфиденциальности. Важна ориентация жилого здания, направленность основных помещений на восток и юг для максимального солнечного освещения зимой и надлежащей вентиляции летом. Одной из наиболее важных особенностей традиционного жилья в этом районе является наличие многофункциональных жилых помещений (гостиная, спальня, кухня), которые повторяются на нескольких этажах (рис. 3) [4].

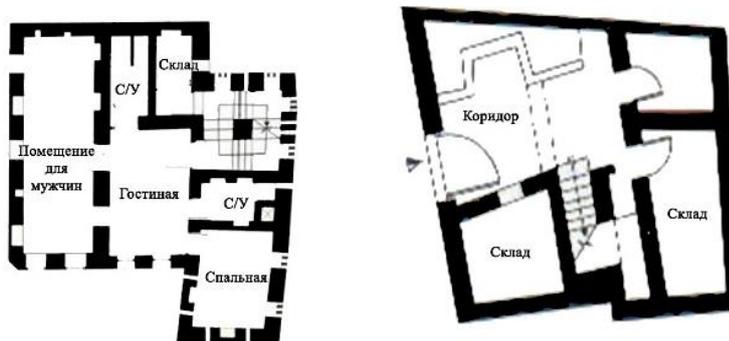


Рис. 3. Планировка жилых зданий в Западном нагорье
Fig. 3. Layout of residential buildings in the Western Highlands

При строительстве жилья йеменская архитектура опирается на симметрию архитектурного образования как форму архитектурного мышления. Большинство традиционных жилых зданий в деталях сходны с внешними пространственными образованиями, такими как украшения и надписи (рис. 4).

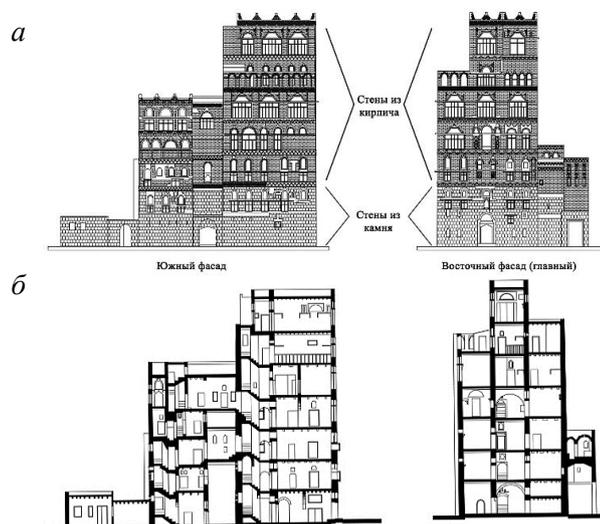


Рис. 4. Тип фасадов зданий Западного нагорья (а) и схематическое изображение связи внешних архитектурных элементов с пространством (б)

Fig. 4. Building facades in the Western Highlands (a) and schematic of external architectural elements in space (b)

Прибрежная равнина

Район Прибрежной равнины выходит на Красное море и характеризуется абсолютно другим климатом по сравнению с Западным нагорьем. Максимальная среднемесячная температура составляет 40 °С в июне, а в остальные месяцы года колеблется в пределах 29–39 °С. Минимальная среднемесячная температура колеблется от 22 °С зимой до 29 °С летом [5]. Годовая норма осадков находится в пределах 13–40 мм/год. Основными строительными материалами в этом регионе являются тростник, глина и камень (рис. 5) [6].



Рис. 5. Типы жилой застройки в районе Прибрежной равнины:
а – из тростника и глины; б – из камня

Fig. 5. Residential buildings in the Coastal Plain area:
a – reeds and clay; b – stone

*Архитектурно-планировочные решения жилых зданий
в районе Прибрежной равнины*

Здания в этом районе характеризуются единой конструктивной идеей, заключающейся в наличии центра (внутренний открытый двор или фойе), огибающего здание с двух и более сторон [7]. Группировка элементов здания вокруг внутреннего двора эффективна с климатической точки зрения [8]. Стиль застройки в этом районе – открытый двор высотой в один этаж, обращенный внутрь (рис. 6).

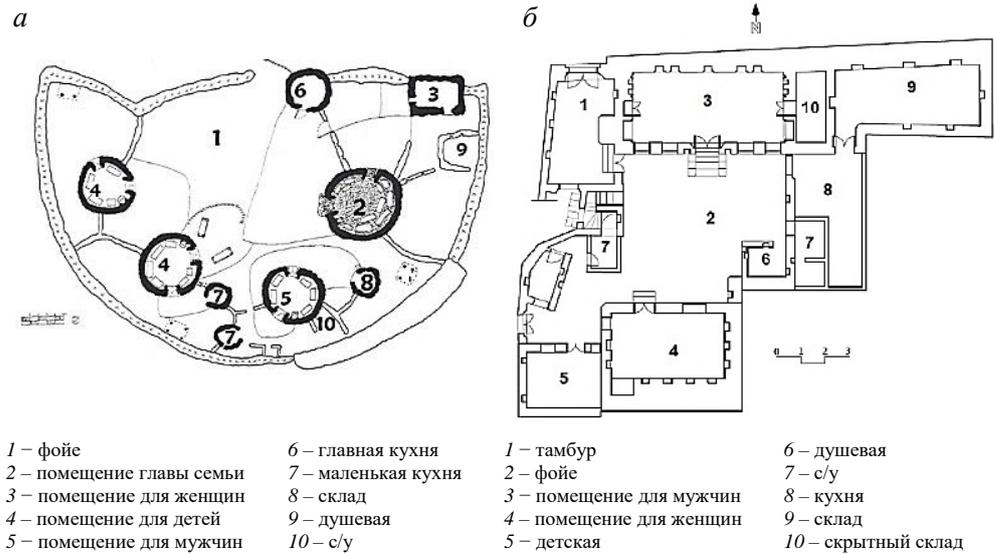


Рис. 6. Планировка жилых зданий в районе Прибрежной равнины:

a – из тростника и глины; *б* – из камня

Fig. 6. Layout of residential buildings in the Coastal Plain area:

a – reeds and clay; *b* – stone

Восточное плато

Этот район расположен между регионом Хадрамут и Западным плато, называется средней котловиной и спускается с запада на восток с изменением высоты от 1170 до 700 м [9]. Восточное плато пересекают долины, идущие с Хадрамута и Гарбии, а северная часть котловины называется Рамлат-эс-Сабьатайн. Климат района Восточного плато сухой и жаркий летом и мягкий зимой, с резким понижением ночной температуры и небольшим количеством сезонных дождей. Максимальная среднемесячная температура достигает 43 °С в июне, а в остальные месяцы года колеблется в пределах 27–42 °С. Минимальная среднемесячная температура находится в диапазоне от 10 °С зимой до 29 °С летом. Годовая норма осадков изменяется в пределах 10–200 мм/год [9]. Основным строительным материалом является предварительно высушенная глина, которая обеспечивает высокую теплоизоляцию и контроль получаемого тепла [10] (рис. 7).



Рис. 7. Тип жилой застройки на Восточном плато
Fig. 7. Type of housing on the Eastern Plateau

Архитектурно-планировочные решения жилых зданий на Восточном плато

В этом регионе жилые здания строятся по типу закрытой башни, как показано на рис. 8. Что касается наружных блоков зданий, то они выполнены в естественном (земля) и белом (известь) цветах сверху и снизу здания и вокруг окон, а иногда эти цвета используют для фасадов зданий, часто общественных и религиозных. Города и села региона характеризуются уникальной архитектурой, применением местных материалов для создания оригинального дизайна, отвечающего требованиям окружающей среды и климата [11]. Архитектурные решения зданий характеризуются вертикальной направленностью (рис. 8).

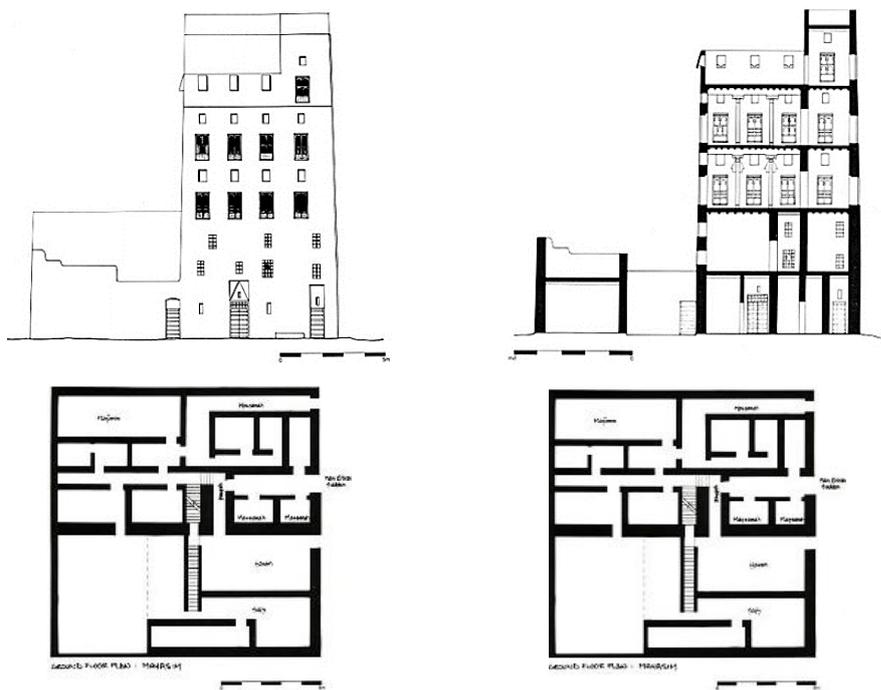


Рис. 8. Архитектурно-планировочные решения жилых зданий на Восточном плато
Fig. 8. Architectural and planning solutions of residential buildings on the Eastern Plateau

Полупустыня

Полупустыня простирается между Восточным плато и Западным нагорьем, а затем понижается с запада на восток. Климат сухой, большую часть территории покрывает песок, дожди бывают редко. Среднемесячная температура достигает максимума 36 °С в июне, а в остальные месяцы года колеблется в пределах 22–35 °С. Минимальная среднемесячная температура варьируется от 5 °С зимой до 20 °С летом. Годовая норма осадков колеблется в пределах 100–200 мм/год. Основным строительным материалом является высушенная на месте глина (рис. 9) [12].



Рис. 9. Тип жилой застройки в районе полупустыни
Fig. 9. Housing in the Semi-desert area

Архитектурно-планировочные решения жилых зданий в полупустыне

Строительство с использованием высушенной глины включает в себя вертикальную укладку рядов глины и их разделение на фасадах утопленными линиями шириной 0,5–0,7 см. Ширина поля составляет 60–70 см. Толщина несущих стен в нижних этажах больше, чем в верхних, поэтому этажность небольшая: 3–5 этажей. Этот стиль постройки встречается в городах Саада, Эль-Джауф и Мариб. Преобладающей является форма закрытой башни, а окна наружу представляют собой небольшие отверстия (рис. 10) [13].

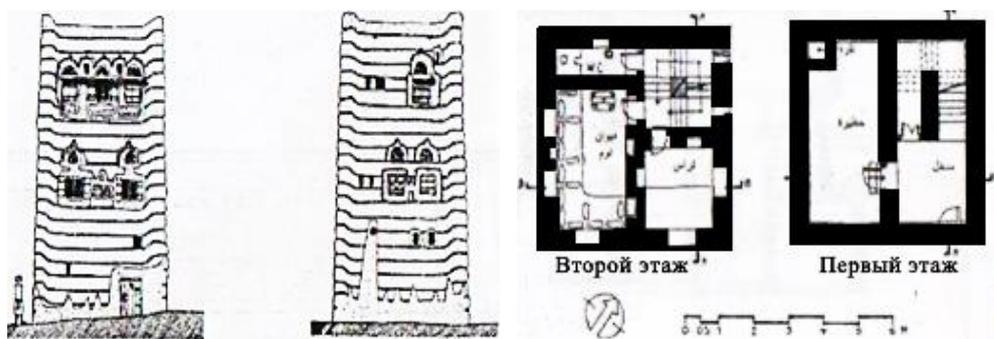


Рис. 10. Архитектурно-планировочное решение жилых зданий в полупустыне
Fig. 10. Architectural and planning solutions of residential buildings in Semi-desert area

Климатические решения проектирования жилых зданий по регионам Йемена

Климатические факторы сыграли основную роль в установлении традиционной архитектуры в городах Йемена в зависимости от климатических условий регионов. Архитектура зданий в этих регионах основана на четырех факторах [14, 15]: форма, ориентация, строительные материалы и проемы зданий.

Форма. Традиционная застройка во всех регионах Йемена в основном квадратная или прямоугольная. Здания круглой формы встречаются редко. В различных регионах идеальными считаются традиционные формы, которые обеспечивают наименьший приток тепла летом и низкие тепловые потери зимой.

Ориентация. Из-за разницы наклона солнечных лучей в разных городах более высокая концентрация солнечного света зимой и летом наблюдается на западном и восточном фасадах зданий. На южных фасадах высокая концентрация наблюдается зимой, а летом северные фасады больше освещаются солнцем, в то время как на южных фасадах солнца меньше. Таким образом, жилые здания ориентированы на юг для обеспечения комфортного тепла летом и зимой.

Строительные материалы. Традиционные строительные материалы (камень, высушенная глина, кирпич) имеют высокую теплоемкость. Они различаются в зависимости от региона, а толщина стен варьируется в зависимости от количества этажей. Большинство зданий в Йемене красят гипсом, поскольку он обладает множеством свойств, в том числе отражает солнечный свет, уменьшает его проникновение через стены, защищает стены от ветра и дождя, способствует увеличению освещения на узких улицах.

Проемы. Дизайн, пропорции, ориентация и положение проемов варьируются в зависимости от их функций (вентиляция, обзорность, освещение). Эти функции могут совмещаться в одном проеме, минимум две из них всегда присутствуют, поэтому детали проемов видоизменяются от региона к региону в зависимости от климатических условий.

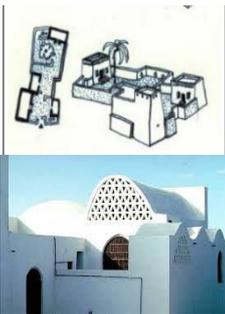
Климатические решения проектирования жилых зданий в различных регионах приведены в таблице.

Климатические решения по проектированию жилых зданий в зависимости от регионов

Climate responsive architecture in different regions

Климатическое проектирование	Жаркий влажный климат	Жаркий сухой климат	Холодный сухой климат
Конструкции здания	Несущая стена, колонны, балки, арка	Несущая стена, колонны, балки	Несущая стена, колонны, балки, арка
Архитектурно-планировочные решения	Открытый внутренний двор или фойе	Закрытая вертикальная система + открытая система типа палатки	Закрытая вертикальная система

Окончание таблицы
End of table

Климатическое проектирование	Жаркий влажный климат	Жаркий сухой климат	Холодный сухой климат
Этажность	1 этаж (домик из тростника и глины в виде гнезда) 2–4 этажа (дома из глины или камня)	2–9 этажей	2–9 этажей
Строительные материалы	Тростник + + глина + гипс Кирпич + + тростник + гипс Камень + глина + + гипс Камень + гипс	Глина + гипс Камень + ткань + кожа	Камень + кирпич Камень + глина + + камень
Вентиляционные элементы архитектуры	Открытый внутренний двор и куполообразные потолки 	Куполообразные потолки + ветровая башня малькаф* 	Окно-балкон машрабия** 

*Малькаф (ветровая башня) – используется для создания естественной циркуляции воздуха внутри помещения. Располагается выше прилегающего здания и имеет одно или несколько вентиляционных отверстий в верхней части, расположенных со стороны преобладающего направления ветра.

**Машрабия (окно-балкон) – узорные деревянные решётки, закрывающие снаружи окна, балконы либо используемые как ширмы или перегородки внутри здания.

Заключение

Древние архитекторы внедрили множество научных подходов к дизайну зданий для обеспечения комфортных условий жизни в жарких и засушливых районах. Разработанные технологии можно использовать и в современном строительстве для снижения энергопотребления и уровня загрязнения атмосферы. Если традиционных решений недостаточно, они могут быть дополнены современными технологиями.

Традиционная архитектура является природной и наследственной основой модернизации местной архитектуры. Несмотря на то, что на Ближнем Востоке имеется богатое архитектурное наследие, оставленное древними зодчими и успешно используемое в условиях местного климата, большинство современных архитекторов пренебрегают традиционными подходами к проектированию зданий. Эти методы могут способствовать повышению энергоэффективности зданий и уменьшению энергозатрат при их эксплуатации. В настоящее время практически нет зданий или проектов, в которых применяются все основные принципы традиционной арабской (йеменской) архитектуры (внутренний двор, ветровая башня малькаф, окно-балкон машрабия и др.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Yemen Geology* // Yemen Encyclopedia, Al-Afif Cultural Foundation. Republic of Yemen, 1992. 341 p.
2. *Ahmed Even*. Introduction to Social Development and Urban Expression // Aga Khan Award for Architecture, Modernity, and Symposium on Heritage. Sana'a, 1983. May 30. P. 21.
3. *Aissa Abdullah Zeid*. Thermal Characteristics of Old and Modern Houses in Sana'a, Yemen : Doctoral dissertation, Higher School of Architectural Association: Environmental and Energy Research Program. UK, 1995. P. 25.
4. *Abbas and Al-Sanabani*. Introduction to Yemen Geomorphology. Sana'a : Abadi Research and Publishing Center. P. 26.
5. *Atef Abdel Aziz*. Diversity of Architectural Styles in Yemen // Alam Al Bena Journal. 1990. I. 1. P. 21.
6. *Kabiela Faris Al-Maliki*. Engineering and Mathematics in Architecture (Proportionality, Organizations, and Proportional Systems). Dar Safaa for Publication and Distribution, Amman, First Edition, 2002. 327 p.
7. *Muhammad Talaat Al-Dali*. Characteristics of Islamic Architecture and Features of Yemeni Architecture // Yemen Research Journal, Yemen Research Center. 1989. I. 35. January–March. 247 p.
8. *Sabah Abdul Latif Meshtat*. Architecture and Desert Environment (Theoretical and Applied Foundations). Sana'a : Abadi Research and Publishing Center, First Edition, 1995. P. 19.
9. *Abbas and Al-Sanabani*. Introduction to Geomorphology of Yemen. Abadi Research and Publication Center, Sana'a.
10. *Abdul Raqib Taher, Muhammad Salam*. Clay Architecture on the Threshold of the Twenty-First Century. First Scientific Conference, Conference on Research and Studies. Hadramout University of Science and Technology, 2000. P. 19.
11. *Abdullah Ahmed Muhairz*. The Content of the City of Shibam and Wadi Hadramout // Yemen Research Journal, Research and Studies Center. 1988. I. 34. October–December. P. 20.
12. *Muhammad Jawas*. Shibam Civilization and History // Al-Thawra Newspaper. 2004. I. 14402. April 17. P. 20.
13. *Abdul Raqib Taher*. Architectural Characteristics and Values of Terracotta Architecture in Yemen // Conference on Human Civilization from Cave to Architecture, Conference Studies and Research. Beirut Heritage Association, 2001. P. 108.
14. *Khaled Al-Dababi*. Architecture of Yemen (Ancient Civilization and Fascinating Landmarks) // Islamic Tourism Magazine. 2004. I. 12. July, August. P. 2.
15. *Yemeni architecture* // Features of formation in Yemeni architecture. URL : https://www.academia.edu/35174079/%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%D8%A9_%D8%A8%D8%A7%D9%84%D9%8A%D9%85%D9%86

REFERENCES

1. Yemen Geology. In: Yemen Encyclopedia, Al-Afif Cultural Foundation, Republic of Yemen, 1992. 341 p.

2. *Ahmed Even*. Introduction to Social Development and Urban Expression. Aga Khan Award for Architecture, Modernity, and Symposium on Heritage. Sana'a, May 30, 1983. 21 p.
3. *Aissa, Abdullah Zeid*. Thermal Characteristics of Old and Modern Houses in Sana'a, Yemen. DSc Thesis. Higher School of Architectural Association: Environmental and Energy Research Program, UK, 1995. 25 p.
4. *Abbas and Al-Sanabani*. Introduction to Yemen Geomorphology. Abadi Research and Publishing Center, Sana'a. p. 26.
5. *Atef Abdel Aziz M*. Diversity of Architectural Styles in Yemen. *Alam Al Bena Journal*. 1990; (1): 21.
6. *Kabiela Faris Al-Maliki*. Engineering and Mathematics in Architecture (Proportionality, Organizations, and Proportional Systems). Dar Safaa for Publication and Distribution, Amman, 1st ed., 2002. 327 p.
7. *Muhammad Talaat Al-Dali*. Characteristics of Islamic Architecture and Features of Yemeni Architecture. *Yemen Research Journal*. 1989; (35): 247.
8. *Sabah Abdul Latif Meshtat*. Architecture and Desert Environment. Theoretical and Applied Foundations. Abadi Research and Publishing Center, Sana'a, 1st ed., 1995. 19 p.
9. *Abbas and Al-Sanabani*. Introduction to Geomorphology of Yemen. Abadi Research and Publication Center, Sana'a.
10. *Abdul Raqib Taher, Muhammad Salam*. In: *Proc. 1st Sci. Conf. 'Clay Architecture on the Threshold of the Twenty-First Century'*, Hadramout University of Science and Technology, 2000. p. 19.
11. *Abdullah Ahmed Muhairz*. The Content of the City of Shibam and Wadi Hadramout. *Yemen Research Journal*. 1988; (34): 20.
12. *Muhammad Jawas*. Shibam Civilization and History. *Al-Thawra Newspaper*. 2004; (14402): 20.
13. *Abdul Raqib Taher D*. Architectural Characteristics and Values of Terracotta Architecture in Yemen. In: *Proc. 1st Sci. Conf. 'Human Civilization from Cave to Architecture'*. Beirut Heritage Association, 2001. P. 108
14. *Khaled Al-Dababi*. Architecture of Yemen. Ancient Civilization and Fascinating Landmarks. *Islamic Tourism Magazine*. 2004; (12): 2.
15. Yemeni architecture: Features of formation in Yemeni architecture. Available: www.academia.edu/35174079/%D8%A7%D9%84%D8%B9%D9%85%D8%A7%D8%B1%D8%A9_%D8%A8%D8%A7%D9%84%D9%8A%D9%85%D9%86

Сведения об авторе

Исам Ибрахим Али Абдо, аспирант, Российский университет дружбы народов, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, es-arefi@mail.ru

Author Details

Esam Ebrahim Ali Abdo, Research Assistant, Peoples' Friendship University of Russia, 6, Miklouho-Maclay, 117198, Moscow, Russia, es-arefi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2024
 Одобрена после рецензирования 12.02.2024
 Принята к публикации 19.04.2024

Submitted for publication 25.01.2024
 Approved after review 12.02.2024
 Accepted for publication 19.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 37–46.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 37–46.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.05

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-37-46

EDN: YZJAJG

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЗАДАЧЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УМНОГО ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ ИННОПОЛИСА)

Петр Андреевич Пылов¹, Роман Вячеславович Майтак¹,
Анна Владимировна Дягилева¹, Татьяна Анатольевна Шалыгина²

¹Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Аннотация. Рассматриваются особенности архитектурной застройки, планировки и оснащения умного города с помощью интеграции алгоритмов и методов искусственного интеллекта.

В качестве *объекта исследования* был выбран город-спутник Казани – Иннополис, который проектировался как город для IT-специалистов.

Актуальность выбранной темы обусловлена стремительными темпами цифровизации, проникающей во все отрасли человеческой деятельности, в том числе в проектирование городов и градостроительство.

Выводы. Систематизация знаний, которые легли в основу проектирования современного отечественного умного города, опыт развития Иннополиса могут стать базой для более быстрого перехода других населенных пунктов в статус смарт-городов.

Ключевые слова: градостроительство, искусственный интеллект, умный город, архитектура зданий

Для цитирования: Пылов П.А., Майтак Р.В., Дягилева А.В., Шалыгина Т.А. Искусственный интеллект в задаче проектирования умного города (на примере Иннополиса) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 37–46. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-37-46. EDN: YZJAJG

ORIGINAL ARTICLE

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DESIGN OF SMART CITY
(THE INNOPOLIS CASE STUDY)****Petr A. Pylov¹, Roman V. Maitak¹,
Anna V. Dyagileva¹, Tat'jana A. Shalygina²**¹*Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia*²*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The paper studies the architectural development, layout and equipment of a smart city based on integration algorithms and artificial intelligence methods. Innopolis, a satellite city of Kazan designed as a city for IT specialists, is an object of research. The relevance of the work is determined by rapid digitalization, which penetrates in all branches of human activity, including urban design and urban planning. The knowledge systematization of a smart city can become the basis for a faster transition of other settlements to smart cities based on the experience of the Innopolis development.

Keywords: urban planning, artificial intelligence, smart city, architecture

For citation: Pylov P.A., Maitak R.V., Dyagileva A.V., Shalygina T.A. Artificial intelligence in design of smart city (the Innopolis case study). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 37–46. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-37-46. EDN: YZJAJG

В эпоху быстро развивающегося технологического прогресса понятие «умный город» становится всё более актуальным. Семантика термина «умный город» обобщает созданную человеком взаимосвязанную систему информационных и коммуникативных технологий, с помощью которых значительно упрощается управление внутренними городскими процессами, а жизнь становится комфортнее и безопаснее [1].

Отметим, что приведенное определение даёт лишь общие опорные критерии, по которым можно выделить из списка городов умные. При этом степень отличия одного умного города от другого определение не поясняет, что дополнительно вносит некоторую степень расплывчатости в семантику термина. На сегодняшний день де-факто сложилось мнение [2], что умный город должен включать в себя:

- 1) развитую цифровую инфраструктуру;
- 2) систему безопасности, интегрированную с интеллектуальными алгоритмами;
- 3) оптимальное управление энергоресурсами;
- 4) оптимизацию транспортной архитектуры, предполагающую возможность перехода к более современному виду транспорта.

Первый пункт является наиболее обширным классом с точки зрения автоматизации, т. к. предполагает цифровую трансформацию большинства процессов (и некоторых профессий в целом), обеспечивающую многократное повышение качества предоставляемой жителям умного города услуги. Оставшиеся (второй, третий и четвертый) пункты в иерархии автоматизации являются

подзадачами первого. Так, охранник в школе умного города замещается специальным программно-аппаратным комплексом, который:

- во много раз быстрее сможет выполнить проверку лиц, посещающих общеобразовательное учреждение;

- обеспечивает круглосуточное исполнение обязанностей, исключаящее усталость, потерю концентрации и другие недостатки, свойственные человеку;

- в связке с другими информационно-технологическими объектами умного города может согласованно решать многие косвенные задачи: поиск пропавшего ребенка, уведомление родителей о прибытии детей в школу и т. д.

Отметим, что степень развитости цифровой инфраструктуры во многом зависит от объёма вовлечения методов искусственного интеллекта в автоматизацию процесса – это объясняется тем, что аппаратная часть оставляет запас вычислительной мощности для интеллектуальных устройств, поэтому обычные пользователи смогут получить более высокий комфорт от автоматизации при наличии более совершенной программной части (новые интеллектуальные алгоритмы).

Рассмотрим путь становления умного города на примере самого молодого города России – Иннополиса. На территории, где сейчас находится одна из столиц отечественной IT-индустрии, в мае 2012 г. простиралась равнинная поля Верхнеуслонского района Республики Татарстан. Поскольку именно эта полуавтономная область в составе Российской Федерации выступала с инициативой строительства, было решено организовать умный город таким образом, чтобы он мог предоставить жителям досуг в гармонии с природой, но вместе с тем был не слишком территориально удалён от третьей столицы России.

Оптимальным вариантом, удовлетворяющим двум условиям, стала правобережная северо-восточная часть Приволжской возвышенности на месте слияния р. Свияги с Волгой. Выбранное местоположение было удалено от Казани всего на 40 км, а для завершения логистической развязки оставалось добавить подъезд от федеральной трассы М7, соединяющей Москву и Казань.

После выбора местоположения следующим пунктом стала разработка проекта умного города. Поскольку умный город должен был стать российской Кремниевой долиной, проект необходимо было прорабатывать с чистого листа, для чего был приглашен известный специалист в области архитектуры Лиу Тай Кер [3]. Однако ориентация города на высокие технологии требовала их привлечения уже на этапе создания проекта, поэтому генерация идей также осуществлялась с использованием интеллектуальных программ. Отметим, что одна из идей (рис. 1) конфигурации объектов умного города, предложенных алгоритмом прикладного искусственного интеллекта, была поддержана большинством голосов.

Изучив представленную генерацию (рис. 1) интеллектуальной модели, ознакомимся с утвержденным проектом начальной застройки Иннополиса (рис. 2).

Визуальное сопоставление данных рис. 1 и 2 позволяет сформулировать некоторые результаты наблюдений.



Рис. 1. Схема конфигурации основных объектов Иннополиса, предложенная интеллектуальной системой на этапе планирования проекта умного города. Синей буквой «У» обозначено здание университета, а буквой «Т» – технопарк (первый технопарк Иннополиса; после застройки назван в честь физика А.С. Попова). Нанесение букв на представленную схему, ориентирующих по объектам инфраструктуры, выполнено при помощи программного продукта Adobe Photoshop 2022

Fig. 1. The model of Innopolis main objects proposed by the intelligent system at the planning stage of the smart city project. Blue letters "Y" and "T" indicate the university building, and technopark, respectively

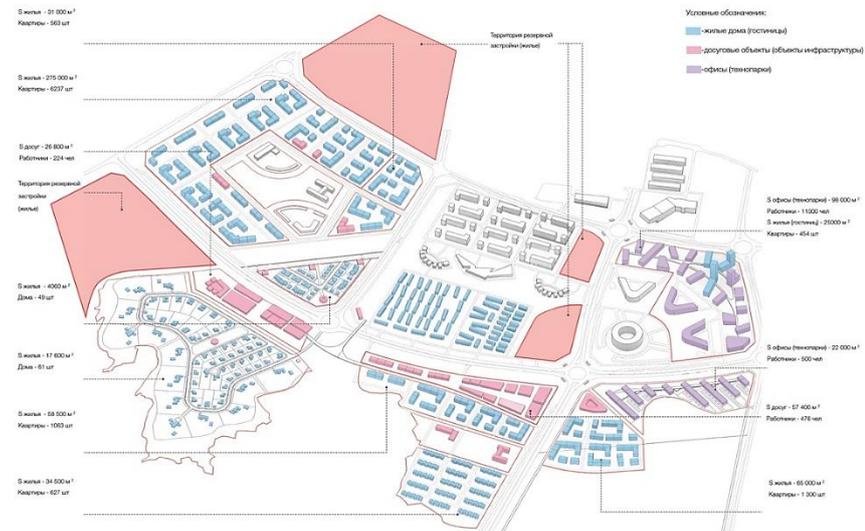


Рис. 2. Утвержденный проект начальной застройки (основных объектов, необходимых для жизни) Иннополиса. Проектная документация стартовой застройки Иннополиса с уточняющими условными обозначениями

Fig. 2. Approved design of the initial (basic facilities necessary for life) development of Innopolis. Design documentation of the Innopolis start-up development with clarifying conventional designations

1. Архитектурная форма высшего учебного заведения детально совпадает с генерацией (рис. 3). Ориентация здания по отношению к первому транспортному кольцу осталась без изменений.

2. Относительно небольшое территориальное удаление, а также подъезд ко второму транспортному кольцу, на которое выходит технопарк, также остались без существенных изменений.

3. Архитектурная форма технопарка, представленная в виде «шайбы», была утверждена в проекте.

4. Окружение технопарка тремя дополнительными кампусами, каждый из которых представлен в виде сплюснутого по бокам полукруга, напоминающего букву «л», представлено в проекте аналогично генерации.

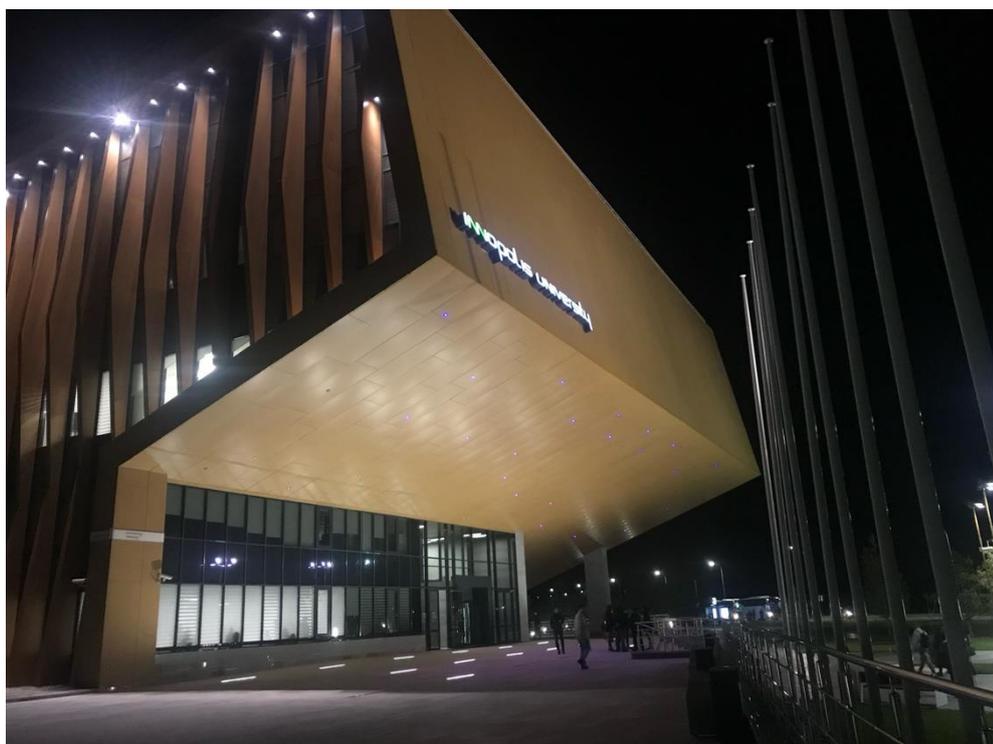


Рис. 3. Здание университета Иннополис. Форма и декоративное оформление торца вертикальными реечными элементами совпадают с генерацией интеллектуальной модели (см. рис. 1), предложенной ещё на этапе проекта города. Фото авторов

Fig. 3. Innopolis University building. The shape and design of the end with vertical slatted elements coincide with that generated by the intellectual model (Fig. 1). The photo is taken by the author

Лепта искусственного интеллекта, вносимая в проект создания умного города, не ограничилась только проектом города. Так, для сохранения возможности развития и безопасного тестирования беспилотного транспорта интеллектуальной системой было предложено устройство подземного перехода между университетом и технопарком. Эта идея также была поддержана и в дальней-

шем воплощена в жизнь, однако в 2012 г. принятию такого решения способствовали следующие обстоятельства:

– Застройка в живописном месте слияния рек географически находилась на незащищенной лесополосой равнине, частые порывы северного ветра могли негативно влиять на комфорт жителей при пешем передвижении по основной городской улице в условиях начального строительства.

– В крупных городах Татарстана для регулирования транспортных потоков и снижения количества автомобильных заторов распространенным решением стала организация подземных пеших переходов (по сравнению с другими городами соседствующих с республикой регионов их заметно больше в Казани, Набережных Челнах). На основании распространенной и отработанной практики подобное предложение интеллектуальной модели не вызвало критики.

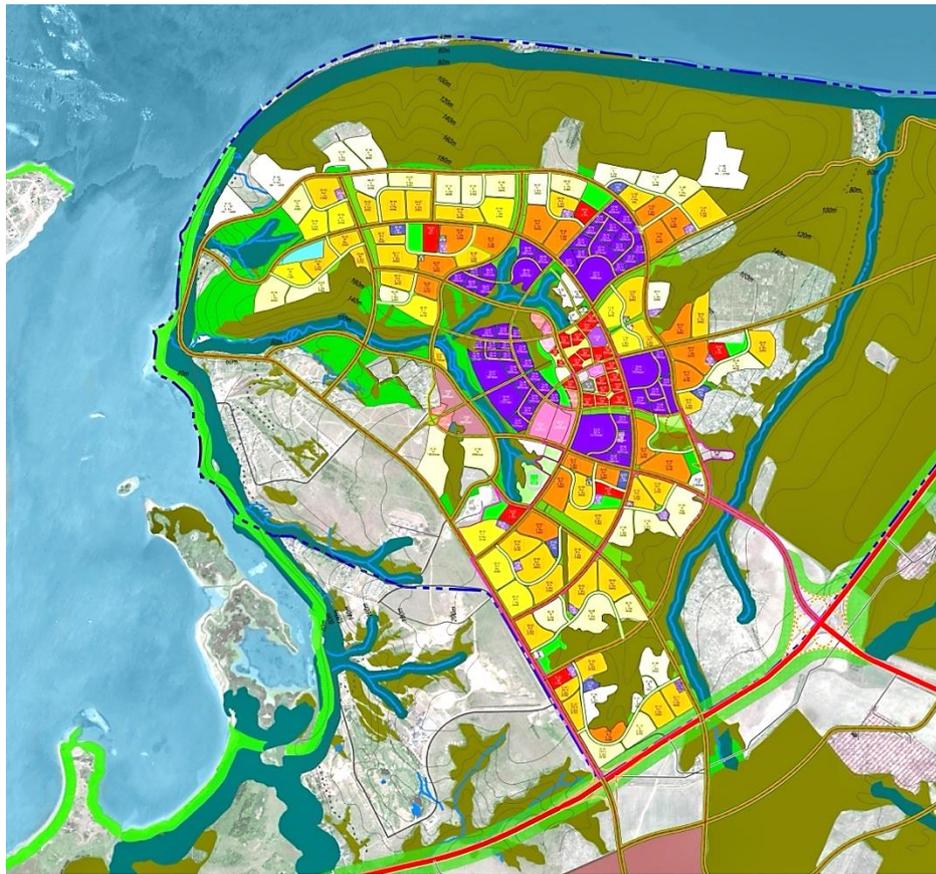
Спустя 6 лет после начала строительства – с ноября 2018 г. – в Иннополисе началось тестирование, а затем и коммерциализация беспилотного транспорта [4]. Наличие системы подземных переходов значительно облегчило интеграцию этого явления в жизнь, т. к. наземные испытания могли проводиться без риска для пешеходов.

После завершения строительства в 2015 г. Иннополис стал заселяться жителями. В том же году стартовал первый массовый набор в автономную некоммерческую организацию высшего образования «Университет Иннополис». Прогресс в области прикладного искусственного интеллекта не стоял на месте, поэтому самые передовые технологии одними из первых в России внедрялись в жизнь именно в Иннополисе:

– Общий чат жителей был перенесён в мессенджер Telegram, который является гибким инструментом, позволяющим интегрировать в группы интеллектуальные модели. Одной из таких моделей стала «виртуальная консьерж Инна» (URL: <https://hightech.fm/2021/04/01/inna-bot>), с помощью которой общие вопросы жителей (например, уточнение расписания пассажирского транспорта) стали решаться без участия человека. Только спустя несколько лет голосовые и виртуальные помощники стали интегрироваться в банковские приложения, получив широкое распространение.

– Беспилотный транспорт стал функционировать в умном городе во многом благодаря его компактному расположению, что позволило быстрее отточить алгоритмы правильного построения карт местности (рис. 4) и отработать нестандартные ситуации. Беспилотное такси Иннополиса, ввиду территориального соседства с дикой природой, сталкивалось с проблемой внезапного появления на проезжей части не только человека, но и представителей фауны, например зайцев. Отработка всех возможных ситуаций инженерами на ограниченном городском пространстве привела к тому, что по состоянию на февраль 2024 г. жители совершили более 40 тыс. поездок без присутствия водителя.

– Беспилотные дроны-доставщики могут доставлять готовую еду, продукты питания, а также малогабаритные товары до адресата по воздуху. Отдельные проекты [5] позволяли заказчику получать посылки непосредственно через окно своего жилища. Только после апробации в Иннополисе проекты доставщиков появились в других крупных городах страны (в том числе в Москве и Санкт-Петербурге).



Детализированный мастер-план территории «Иннополис»

Субботы	Медиа	Детский сад	Рекреационный клуб	Жилая зона	Автомобильная станция	3 этажные здания (См. B)	1-3 этажные здания (См. A)
Музеи	Спортивные	Дворы для парковки	Парки	IT-Сити	Рынок CB	4-6 этажные здания (См. C)	
Дом культуры	Конференц-центр	Центр обслуживания	Предшкольный садик	Университет	Торговая зона	3 этажные здания (См. B)	

Рис. 4. Карта местности Иннополиса, которая использовалась для обучения беспилотного транспорта. Разделение территории на зоны, представленные на карте, позволило многократно увеличить точность навигации беспилотников (такси и дронов) (детализированный мастер-план территории «Иннополис»)

Fig. 4. Innopolis map used for training unmanned transport. The territory zoning allows multiplying the navigation accuracy of drones (taxi and drones) (detailed master plan of the Innopolis territory)

– Умные дома подразумевают систему бесконтактного доступа – открытие двери по биометрическим данным (сканирование лица, радужной оболочки глаза или отпечатка пальца), а также наличие усовершенствованной системы жилищно-коммунального хозяйства: в большинстве домов показатели индивидуальных приборов учета автоматически отправляют информацию о расходе электроэнергии и воды, а владельцу остается только оплатить счета.

– Роботизированная гостиница подразумевает замещение всех должностей, которые традиционно занимал человек, электронными работниками. Для анализа предпочтений клиентов исследуются открытые данные из их соци-

альных сетей, а для контроля уровня удовлетворенности предоставляемыми услугами и сервисом – анализ интонации речи, выражения лица и эмоций.

Популярность умного города и третьего наукограда Российской Федерации превысила ожидаемые прогнозы, поэтому утверждённый план развития Иннополиса до 2035 г. включает в себя планировку дополнительных жилых зданий и имплементацию инфраструктуры современного города: медицинских центров, галерей, детских центров, гостиниц (рис. 5).

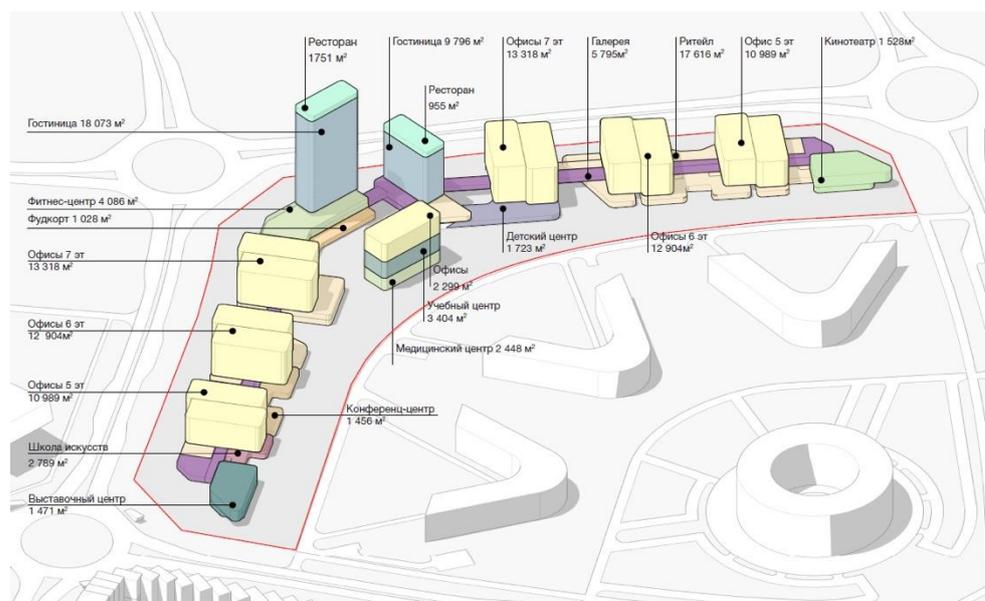


Рис. 5. Проект генерального плана развития муниципального образования «город Иннополис» до 2035 г. Источник: официальный портал правовой информации Республики Татарстан¹

Fig. 5. Draft master plan of Innopolis city development till 2035. Source: Official legal information portal of the Republic of Tatarstan

Отметим, что задачу создания дизайн-проекта внешнего облика и внутреннего устройства будущих зданий (рис. 5) также предполагается делегировать искусственному интеллекту [6], при этом конечный вариант каждой постройки будут выбирать жители на основе голосования.

Выводы

Рассмотренные в статье объекты архитектуры, а также способы их размещения в городском пространстве были получены с помощью инструментария прикладного искусственного интеллекта. Отличительные объекты архитектуры Иннополиса – здания университета и технопарка – являются первыми в своем роде, т. к. за основу проекта были приняты сгенерированные искусственной нейронной сетью изображения. Этот исторический факт подчерки-

¹ URL: https://pravo.tatarstan.ru/file/npa/2019-12/482849/npa_482850.pdf

вает особое место в современном социуме информационных технологий, которые проникли во все сферы человеческой деятельности, во многом облегчая не только рутинный, но и творческий труд людей.

Стоит отметить, что реализация проекта умного города во многом увеличила скорость интеграции инновационных технологий с реалиями повседневной жизни: апробация роботов-доставщиков, метод построения карт местности на основе разбиения города по зонам – все эти факторы в совокупности позволили формализовать правила, по которым функционируют беспилотные устройства. Для создания таких правил в рамках больших городов потребовалось бы парализовать движение определенного сектора мегаполиса, что неизбежно повлекло бы за собой негативные последствия как для жителей, так и для экономики в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Волков А.А., Седов А.В., Челышков П.Д. Концепция «Умный город». – Москва : Московский государственный строительный университет. ЭБС АСВ, 2015. 92 с. ISBN 978-5-7264-1202-3.
2. Smith J. Cleaning Robots: Technology, Trends, and Future Perspectives. ABC Press, 2021. 250 p.
3. Девинь М. Шесть городов для новаторов // Архи Ру. 2024. URL: <https://archi.ru/russia/70664/shest-gorodov-dlya-novatorov?ysclid=lsqk9329w9463092859> (дата обращения: 11.02.2024).
4. Смирнов Д. Бессмертный дрон, умные домофоны и новая валютная система: что изобрели и внедрили в Иннополисе за 10 лет // Хайтек. 2024. URL: <https://hightech.fm/2022/06/09/innopolis-discoveries> (дата обращения: 11.02.2024).
5. Бондаревская О. Сердце умного города // Общественно-политическое издание «Татарстан». 2022. URL: <https://protatarstan.ru/news/tema-nomera/serdze-umnogo-goroda-innopolis?ysclid=lsqku7hxq7841187560> (дата обращения: 11.02.2024).
6. Хабидуллин Р. План проекта развития Иннополиса // Официальный портал правовой информации Республики Татарстан. 2024. URL: https://pravo.tatarstan.ru/file/npa/2019-12/482849/npa_482850.pdf (дата обращения: 11.02.2024).

REFERENCES

1. Volkov A.A., Sedov A.V., Chelyshkov P.D. Smart City Concept. Moscow: ASV, 2015. 92 p. ISBN 978-5-7264-1202-3. (In Russian)
2. Smith J. Cleaning Robots: Technology, Trends, and Future Perspectives. ABC Press, 2021. 250 p.
3. Devigne M. Six cities for innovators. Available: <https://archi.ru/russia/70664/shest-gorodov-dlya-novatorov?ysclid=lsqk9329w9463092859> (accessed February 11, 2024). (In Russian)
4. Smirnov D. Deathless drone, smart intercoms and new currency system: What Innopolis has invented and implemented during 10 years Available: <https://hightech.fm/2022/06/09/innopolis-discoveries> (accessed February 11, 2024). (In Russian)
5. Bondarevskaya O. The heart of a smart city. Available: <https://protatarstan.ru/news/tema-nomera/serdze-umnogo-goroda-innopolis?ysclid=lsqku7hxq7841187560> (accessed February 11, 2024). (In Russian)
6. Habibullin R. Innopolis development project plan. Available: https://pravo.tatarstan.ru/file/npa/2019-12/482849/npa_482850.pdf (accessed February 11, 2024). (In Russian)

Сведения об авторах

Пылов Петр Андреевич, аспирант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, pylova@kuzstu.ru

Майтак Роман Вячеславович, магистрант, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, super-energy@mail.ru

Дягилева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, dyagileva@mail.ru

Шалыгина Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shal53@mail.ru

Authors Details

Petr A. Pylov, Research Assistant, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, pylovpa@kuzstu.ru

Roman V. Maitak, Graduate Student, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, super-energy@mail.ru

Anna V. Dyagileva, PhD, A/Professor, Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya Str., 650000, Kemerovo, Russia, dyagileva@mail.ru

Tat'jana A. Shalygina, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shal53@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 47–62.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 47–62.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 712.5

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-47-62

EDN: VSYDFS

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ФУНКЦИОНАЛЬНОМУ ЗОНИРОВАНИЮ НАБЕРЕЖНЫХ И ИХ ПРЕДМЕТНО-ПРОСТРАНСТВЕННОМУ НАПОЛНЕНИЮ

Полина Сергеевна Подпорина, Олеся Олеговна Смолина

Новосибирский государственный

архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

г. Новосибирск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Высокий уровень урбанизации определяет спрос на создание комфортных мест для отдыха у воды. Современные набережные предоставляют условия не только для пассивного досуга населения, но и позволяют обеспечить физическую активность граждан, в частности, благодаря созданию различных видов спортивных площадок, в том числе и реабилитации. Однако с помощью опроса и анкетирования выявлено, что на сегодняшний день набережные в городах не полностью удовлетворяют потребностям населения.

Цель. Комплексная оценка и систематизация данных по зонированию и благоустройству набережных.

Новизна. Типологическая и функциональная оценка набережных в России: набережная реки Амур (Комсомольск-на-Амуре), Университетская (Белгород), набережная реки Урал (Оренбург), набережная реки Оки (Орёл) и за рубежом: Марина Бэй (Сингапур), Хорнсбергс Странд-парк (Стокгольм), Вайтань (Шанхай), разработка научно-практических рекомендаций по размещению и наполнению современных функциональных зон.

Методы. Терминологический и теоретический сравнительный анализ, функционально-планировочный, типологический, нормативно-правовой анализ, анкетирование, опрос.

Результаты исследования. Разработаны варианты размещения и наполнения новых, редко используемых функциональных зон на городских набережных согласно потребностям населения.

Ключевые слова: прибрежные территории, городская набережная, благоустройство, функциональное зонирование, рекреационная среда

Для цитирования: Подпорина П.С., Смолина О.О. Анализ современных подходов к функциональному зонированию набережных и их предметно-пространственному наполнению // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 47–62. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-47-62. EDN: VSYDFS

ORIGINAL ARTICLE

MODERN APPROACHES TO FUNCTIONAL ZONING AND SPACE FILLING OF EMBANKMENTS**Polina S. Podporina, Olesya O. Smolina***Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia*

Abstract. Due to the high level of urbanization, there is a high demand for the creation of comfortable places for recreation near the water. Modern embankments not only provide leisure for people, but also allow to ensure their physical activity, in particular, thanks to the creation of sports grounds and recreation sites. However, embankments in cities do not fully satisfy the needs of the population.

Purpose: The data systematization of embankment zoning and improvement.

Methodology/approach: Terminological and theoretical comparative analyses, functional and planning, typological, regulatory and legal analysis, questionnaire, survey.

Research findings: Locations and infill of new, rarely used functional areas on urban waterfronts are developed with respect to the needs of the population.

Originality: Embankments in Komsomolsk-on-Amur, Belgorod, Orenburg, Orel in Russia and Marina Bay (Singapore), Hornsbergs Strand Park (Stockholm), Waitan (Shanghai) abroad are theoretically evaluated in terms of their functionality. Scientific and practical recommendations are given to location and filling of functional zones, which are currently new and rare.

Keywords: coastal territories, city embankment, improvement, functional zoning, recreational environment

For citation: Podporina P.S., Smolina O.O. Modern approaches to functional zoning and space filling of embankments. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (3): 47–62. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-47-62. EDN: VSYDFS

Введение

Набережная – линейный элемент планировочной структуры населенного пункта, располагаемый вдоль берега и предназначенный для движения и отдыха пешеходов или для движения пешеходов и транспорта, представляющий собой открытую благоустроенную территорию общего пользования на поверхности берегоукрепительного сооружения, непосредственно примыкающего к водному объекту или находящегося на удалении от береговой линии¹. Набережные являются важными элементами городской инфраструктуры, что позволяет реализовать многие потребности населения в пассивном и активном отдыхе, в ландшафтно-рекреационной среде, неразрывно связанной с водным объектом. Кроме того, набережные часто стилизованы с помощью различных методов ландшафтного дизайна для создания репрезентативной и комфортной среды для посетителей.

¹ СП 398.1325800.2018. Набережные. Правила градостроительного проектирования: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 29 ноября 2018 г. № 773: введен в действие с 30.05.2019. Москва: Стандартинформ, 2019. 31 с.

Современные исследователи уделяют все больше внимания вопросу развития прибрежных территорий и созданию проектных решений для их организации, среди них М.В. Савельев [1], А.А. Звезгинцева [2], Р.К. Краснов [3], Е.В. Баклаженко [4], Р.Р. Хасанов [5] и др.

Целью исследования является комплексная оценка и систематизация данных функционального зонирования набережных в России (Комсомольск-на-Амуре, Белгород, Оренбург, Орёл) и за рубежом (Сингапур, г. Сингапур; Швеция, г. Стокгольм; Китай, г. Шанхай).

Задачи исследования включают анализ теоретической базы, в том числе подходов к функциональному зонированию и предметно-пространственному наполнению набережных, а также апробацию результатов.

В ходе исследования выстраивается авторский подход к современному функциональному зонированию и типологии набережных, что определяет новизну работы.

Анализ теоретической базы

Согласно СП 398.1325800.2018, набережные могут быть разделены на два типа:

- транспортно-пешеходные;
- бестранспортные.

Транспортно-пешеходные набережные могут быть улицами различных уровней – общегородского, районного и местного значения. На них могут быть предусмотрены зоны для проведения различных массовых мероприятий.

Бестранспортные набережные, предназначенные для отдыха и туристической деятельности населения, могут быть спроектированы в форме пешеходных улиц, площадей или пешеходных зон, соединенных с другими пешеходными улицами или их участками на смежных территориях. Разновидностью бестранспортных набережных являются набережные-променады, которые проходят как по застроенным территориям, так и в рекреационных зонах.

Возможно проектирование набережных с зонами для проведения массовых мероприятий, набережных-парков и многофункциональных набережных. Они могут быть расположены непосредственно у водных объектов или находиться на некотором удалении от них, при этом территории между береговой линией и набережной предполагается использовать для пляжного отдыха, рекреации и др.

Теоретический анализ благоустройства набережных² позволяет выявить три различных подхода к их зонированию:

1. Объемно-функциональный подход.
2. Объемно-пространственный подход.
3. Современный подход.

Объемно-функциональное зонирование территории набережной подразумевает дифференцированное выделение следующих функциональных зон³ (рис. 1):

² Благоустройство городских набережных: методические рекомендации по реализации проектов повышения качества среды моногородов / ООО «КБ Стрелка», НКО «Фонд развития моногородов». Москва, 2018. С. 33.

1. Водный объект.
2. Береговая линия.
3. Транзитная зона. Одна из наиболее используемых зон. На ней часто организуют пешеходное и велосипедное движение.
4. Центральная зона. Участок территории с широким функционалом: точки питания, информационные павильоны, детские спортивные площадки, в шаговой доступности транспортные узлы и остановки общественного транспорта.
5. Зона отдыха. Площадки активного и пассивного отдыха.
6. Внешняя граница набережной.

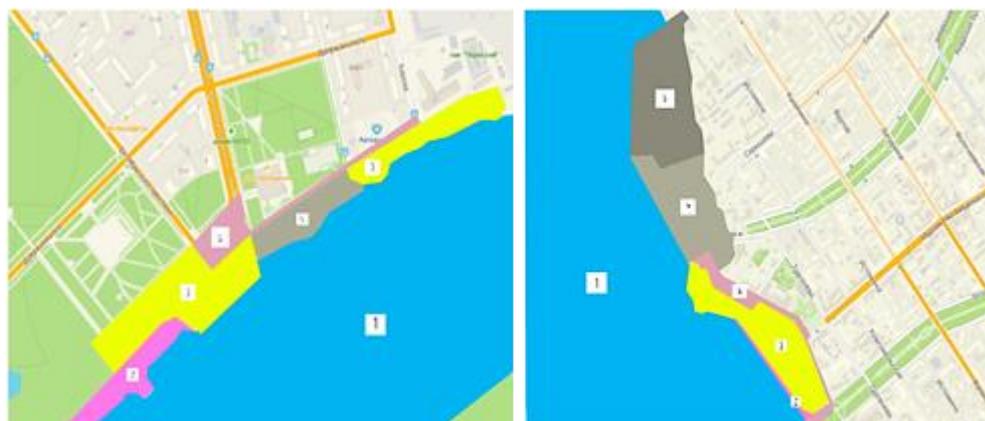


Рис. 1. Функциональное зонирование Комсомольска-на-Амуре и Хабаровска (города России) [6]:

1 – водный объект; 2 – береговая линия; 3 – транзитная зона; 4 – центральная зона; 5 – зона отдыха; 6 – внешняя граница набережной

Fig. 1. Functional zoning in Komsomolsk-on-Amur and Khabarovsk [6]:

1 – water body; 2 – shoreline; 3 – transit zone; 4 – central zone; 5 – recreation zone; 6 – external boundary of the embankment

Применение различных объемно-пространственных решений плавно вытекает из первого подхода. Оно включает в себя организацию уровней ландшафта (использование вертикального зонирования) с применением различных современных материалов. Такой подход позволит избежать однообразия, разграничить уровни пространства набережной и придать ей уникальность (рис. 2).

Каждому уровню может соответствовать разное функциональное наполнение. Например, нижний, ближайший к водной поверхности, уровень может быть предназначен для спокойного отдыха, в то время как верхний уровень набережной будет отведен под променады и различные виды активного отдыха. На разноуровневых набережных также находится множество видовых точек.

³ Благоустройство городских набережных: методические рекомендации по реализации проектов повышения качества среды моногородов / ООО «КБ Стрелка», НКО «Фонд развития моногородов». Москва, 2018. С. 33.



Рис. 2. Террасирование набережных:

a – набережная Москвы у речного вокзала; *б* – набережная Красноярска у ТЦ «Красноярье»; *в* – набережная г. Камышина; *г* – набережная Челябинска⁴

Fig. 2. Terracing of embankments:

a – in Moscow, near the river station; *b* – in Krasnoyarsk, near the shopping center; *c* – in Kamyshin; *d* – in Chelyabinsk

Третий подход благоустройства набережных основан на учете **современных потребностей** населения. Создание комфортной рекреационной среды должно учитывать все потребности населения, определяющие новые функциональные зоны на территории набережной. В их числе:

- физкультурно-оздоровительная зона, включающая в себя спортивные площадки, в том числе экстремальных видов спорта, реабилитации населения, а также зоны велокоммуникаций;
- зона отдыха детей: детские площадки для игр и отдыха, в том числе адаптивная для маломобильных групп населения (МГН);
- зона массовых мероприятий – общественная зона, в том числе зона концертов, мастер-классов, проведения лекций/лекторий, зона аттракционов, включающая объекты общественного питания и др.;
- зона тихого отдыха – пассивная зона – территории с зелеными насаждениями, водоемами и малые архитектурные формы (МАФ);
- зона культурно-просветительских мероприятий – историко-культурная зона с выставочными павильонами;
- административно-хозяйственная зона: хозяйственные площадки, административные сооружения, площадка для выгула/дрессировки собак, парковки, в том числе для МГН;

⁴ Современная набережная – 98 фото // Заметки путешественника: [сайт]. URL: <https://bangkok-book.ru/zametki/sovremennaya-naberezhnaya-98-foto.html> (дата обращения: 30.11.2023).

- обзорная (смотровая) зона;
- коммуникационная зона;
- прибрежная зона/зона пляжа;
- зона курения.

Специализация набережной и потенциальное использование территории определяются характеристиками основных функциональных зон. Эти характеристики основаны на анализе архитектурно-планировочной ситуации (рис. 3).



Рис. 3. Функциональное зонирование Комсомольска-на-Амуре и Орла (города России) [6]
Fig. 3. Functional zoning in Komsomolsk-on-Amur and Orel [6]

Предметно-пространственное наполнение набережных

При проектировании комплексного благоустройства набережных допускается применять: декоративные покрытия транспортных и пешеходных путей; древесно-кустарниковые насаждения; микрорельеф; площадки (видовые, для отдыха, игровые и др.); МАФ (декоративные бассейны и водные устройства, объекты визуальной информации, монументально-декоративного искусства, светильники наружного освещения проезжих частей и тротуаров улично-дорожной сети, подсветки фасадов зданий и сооружений)⁵.

В рамках создания безопасной и эстетически комфортной среды для благоустройства набережных важно использовать единый стиль в оформлении МАФ. Внешний вид и материал МАФ должны соответствовать текущей или планируемой пространственной и композиционной структуре набережной. Такой подход позволит достичь гармонии и целостности проекта.

При выборе МАФ следует использовать:

- каталоги готовых изделий, допущенных к применению в порядке, предусмотренном действующим законодательством Российской Федерации;
- изделия, обеспечивающие удобство эксплуатации.⁶

При оформлении набережных необходимо применять различные декоративные и монументальные элементы, такие как скульптуры (скульптурные композиции), в том числе арборскульптуры, ландшафтные объекты, которые

⁵ СП 389.1325800.2018. Набережные. Правила градостроительного проектирования.

⁶ Там же.

должны соответствовать общей архитектурно-ландшафтной среде. Также важным элементом архитектурного решения набережных являются парапеты. Нередко на набережных можно заметить присутствие камней, валунов, различных декоративных форм из природных материалов.

Арборскультура – это уникальный подход к ландшафтному дизайну, основанный на работе с древесно-кустарниковыми насаждениями и позволяющий корректировать их рост таким образом, чтобы в структуре стволов и веток проявлялись архитектурные и художественные элементы [7]. Используя этот метод, можно создавать неповторимые пространства с определенными функциональными и композиционными задачами в рамках парков, садов и территорий скверов [8].

Для разделения различных пространств, таких как тротуары, велодорожки и др., рекомендуется применять ограждения в виде малых архитектурных форм, в их числе арки, перголы, декоративные стенки, тумбы и другие элементы (таблица).

Принципы, лежащие в основе комплексного благоустройства набережных:

- целостность объемно-планировочной структуры и благоустройства территории набережных, учитывающая транспортные и архитектурно-ландшафтные особенности всего населенного пункта;
- сохранение окружающей среды и особенностей природы (включая климатические, микроклиматические и санитарно-гигиенические условия), а также возможность использования ландшафта;
- функциональное зонирование территории набережной;
- поддержание функционального и композиционного единства открытых пространств набережных и архитектурного оформления окружающих их зданий и сооружений, а также открытых и зеленых пространств.

Перечень малых архитектурных форм функциональных зон

List of small architectural forms in functional areas

Функциональная зона	Малые архитектурные формы	
	Часто используемые	Редко используемые
Коммуникационная		
Физкультурно-оздоровительная		
Зона тихого отдыха		
Детского отдыха		
Смотровая		
Массовых мероприятий		
Культурно-просветительских мероприятий		

Окончание таблицы
End of table

Функциональная зона	Малые архитектурные формы	
	Часто используемые	Редко используемые
Прибрежная/пляжная		
Административно-хозяйственная		

Примечание. Скамья может быть заменена беседкой, садово-парковой мебелью.

Условные обозначения:			
	декоративные элементы для вертикального озеленения (арка, трельяж, пергола и т. д.)		беседка
	скамья		садово-парковая мебель (стулья, столы в зоне питания)
	навес		шезлонг
	уличные тренажеры		турники
	скейт-парк		качели
	тренажеры для дрессировки собак		информационное/рекламное табло
	фонтан		питьевой фонтан
	арборскульптура		декоративно-монументальные формы
	аттракционы		детские игровые комплексы
	уличный фонарь		урна
	элементы доступной среды (пантус, тактильная плитка, съезды и др.)		экстренная кнопка вызова
	диспенсер для бумажных пакетов		столы для игры в шахматы/шашки
	парковки велосипедов и самокатов		тактильные плитки

Следует отметить, что для каждой функциональной зоны существует свой набор малых архитектурных форм. Именно симбиоз МАФ создает комфортную и безопасную среду.

Апробация результатов

Городские набережные включают в себя как эстетический аспект формирования архитектурной среды, так и принципы организации общественной рекреации в зонах с особыми условиями использования территории – водо-

охранной и прибрежной. Анализируя состояние современных набережных, можно сделать вывод, что проблема благоустройства и создания комфортной и доступной для человека среды остается актуальной для большого количества городов России [3].

Для создания комфортной среды на набережной важно применять предложенные подходы функционального зонирования. Главный фактор при выборе подхода – это удовлетворение потребностей жителей города.

Так, опрос жителей показал, что большинство респондентов нуждаются в физкультурно-оздоровительной зоне, а также в зоне тихого отдыха, санитарной и коммуникационной. Респондентами были предложены такие зоны, как зона чтения с расположением МАФ (шкафы для книг, удобные кресла) и зона рыбалки (рис. 4).

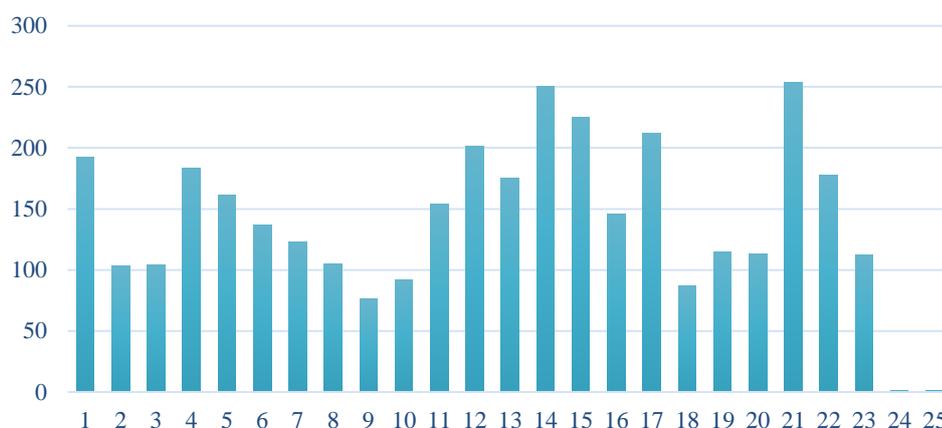


Рис. 4. Результаты опроса потребности жителей в функциональных зонах набережных:

1 – обзорная; 2 – зона лекториев/open-air; 3 – зона проведения мастер-классов; 4 – общественного питания; 5 – концертная; 6 – зона аттракционов; 7 – танцевальная (площадки для танцев); 8 – выгул собак; 9 – зона курения (открытая); 10 – зона курения (закрытая); 11 – культурно-просветительских мероприятий; 12 – коммуникационная; 13 – велодорожки; 14 – тихого отдыха; 15 – прибрежная; 16 – адаптивная зона для МГН; 17 – санитарная зона; 18 – зона отдыха детей 0–3 лет; 19 – зона отдыха детей 3–12 лет; 20 – зона отдыха детей 12+; 21 – физкультурно-оздоровительная; 22 – фото-зоны; 23 – зона высадки древесной растительности (аллея выпускников, семейное дерево, дерево мира); 24 – зона для чтения; 25 – зона рыбалки

Fig. 4. Needs of residents in functional areas on embankments:

1 – overview; 2 – lectureship/open-air; 3 – master class area; 4 – catering; 5 – concert; 6 – amusement zone; 7 – dance (dance platforms); 8 – dog walking; 9 – smoking area (open); 10 – smoking area (closed); 11 – cultural and educational events; 12 – communication; 13 – bike paths; 14 – quiet rest; 15 – coastal; 16 – adaptive zone; 17 – sanitary zone; 18 – for children 0–3 years; 19 – for children 3–12 years; 20 – for children 12+ years; 21 – physical education and recreation; 22 – photo zones; 23 – tree vegetation planting; 24 – reading; 25 – fishing

Как уже отмечалось, самой востребованной является физкультурно-оздоровительная зона, которую можно разделить на спортивные площадки

и зону экстремальных видов спорта. Большинство респондентов отдали свое предпочтение тренажерным площадкам и скейт-паркам (рис. 5).

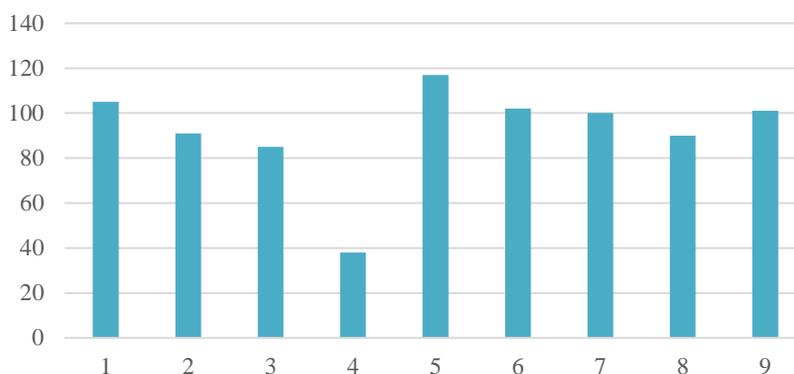


Рис. 5. Выборка спортивных зон:

1 – скейт-парк; 2 – волейбольные площадки; 3 – баскетбольные площадки; 4 – футбольное поле; 5 – тренажерные площадки; 6 – зона воркаута; 7 – столы для настольного тенниса; 8 – спортивные зоны для реабилитации населения; 9 – столы для игры в шахматы/ шашки

Fig. 5. Selection of sports areas:

1 – skate park; 2 – volleyball courts; 3 – basketball courts; 4 – football field; 5 – exercise areas; 6 – workout area; 7 – table tennis tables; 8 – sports areas for rehabilitation of the population; 9 – chess/checkers tables

В опросе населения участвовали респонденты разных возрастных категорий (рис. 6).

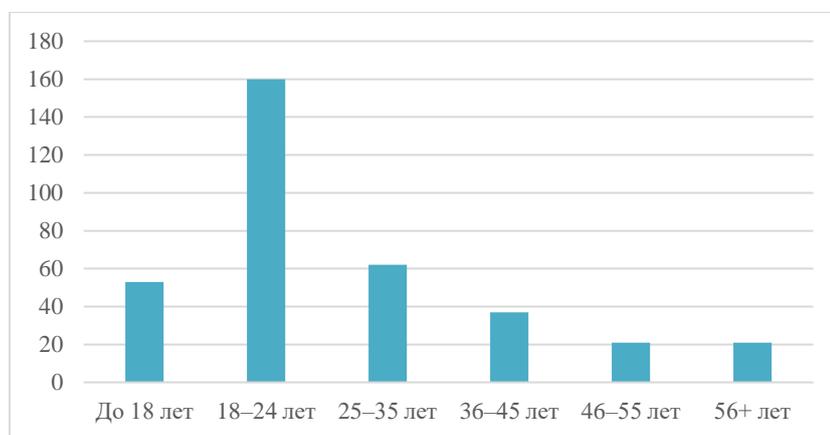


Рис. 6. Возрастные категории респондентов

Fig. 6. Age categories of respondents

Для анализа функционального зонирования речных набережных были рассмотрены крупные и крупнейшие города России и некоторые зарубежные.

Анализ зонирования зарубежных набережных выявил незначительное количество площадок, среди них: коммуникационная, тихая, обзорная и зона питания. Прибрежные зоны используются как променады, что не раскрывает полного потенциала данной территории.

Перспективными функциональными зонами с учетом современных потребностей населения считаются: зона лекториев/open-air, мастер-классов, зона чтения книг, зона выгула собак, зона высадки древесной растительности, зона рыбалки, фото-зоны, адаптивные детские /спортивные зоны для МГН.

Зоны лекториев/open-air, мастер-классов и чтения книг (рис. 8, а, б) предоставляют возможность проведения разнообразных образовательных мероприятий на открытом воздухе. В настоящее время все больше людей предпочитают проводить подобные мероприятия на свежем воздухе. Данный формат позволяет установить органичный контакт с аудиторией, стимулирует более эффективное усвоение знаний и создает комфортную обстановку для обучения. Организация мероприятий на открытом воздухе дает возможность реализовать разнообразие форматов и подходов к обучению, проводить интерактивные и практические занятия. Также данные зоны направлены на создание сообщества, объединяющего людей с похожими интересами в области образования и культуры. Они стимулируют обмен знаниями, идеями и опытом между участниками, тем самым определяя развитие интеллектуальной и культурной среды.



Рис. 8. Примеры благоустройства и проектирования зон:

а – зона лекториев; б – зона чтения; в – зона выгула собак; г – зона высадки древесных растений («Аллея выпускников»); д – обзорные площадки; е – адаптивные зоны МГН

Fig. 8. Examples of zone improvement and design:

а – lecture hall; б – reading area; в – dog walking area; д – planting zone of woody plants (alley of graduates); е – observation decks; ф – adaptive zones of limited mobility people

Устройство зоны выгула собак (рис. 8, в) позволит повысить степень чистоты города и будет отвечать потребностям владельцев собак в безопасном

и удобном месте для активного выгула и игры с питомцами. Площадки для прогулок домашних животных должны размещаться на расстоянии не менее 25 м от жилых домов. В свою очередь, площадки для тренировки собак должны находиться на расстоянии не менее 50 м от ближайших зданий. Важно отметить, что оба типа площадок должны быть оснащены высоким ограждением, скамейками и урнами, а также иметь доступ к тренировочному оборудованию [9]. При проектировании и благоустройстве площадок рекомендуется:

- использовать комбинированное покрытие – песчаное и газонное;
- оборудовать места для отдыха хозяев животных (скамьи, беседки, урны, столы);
- устанавливать качественное и безопасное оборудование для животных;
- обеспечивать освещение площадок в вечернее время суток;
- зонировать площадки для собак мелких и крупных пород;
- оснащать бесплатными дог-пакетами, поилками (фонтанами) для животных;
- проведение мероприятий в данных парках будет мотивировать хозяев выгуливать своих животных в специально отведенных местах;
- организовать доступ к бесплатному Wi-Fi для хозяев животных [10].

Зона высадки древесной растительности (рис. 8, з) призвана способствовать улучшению экологической обстановки, в частности повышению качества воздуха; увеличению концентрации кислорода и снижению уровня загрязнения, что важно для создания здоровой и устойчивой среды проживания и отдыха горожан; созданию условий для заложения основ эковоспитания молодого поколения.

Обзорные площадки, зона тихого отдыха, прибрежная зона, адаптивная зона для МГН, фото-зоны, площадки для высадки древесной растительности и зона рыбалки не регламентируются СП 475.1325800.2020.

Обзорные площадки (рис. 8, д) рекомендуется располагать вдоль водной линии в репрезентативных местах. *Зону тихого отдыха и высадки древесной растительности* рекомендуется располагать в удалении от детских и спортивных площадок, в глубине территории набережной.

При устройстве «Аллей выпускников» следует определиться с типом высадки растений и размерами пешеходных зон; перед посадкой следует подобрать растения исходя из их экологического паспорта, изучить режим полива растений, их индивидуальные особенности, декоративность.

Рекомендуемое расположение *зоны рыбалки* – вблизи прибрежной зоны, вдоль водной линии набережной, в удалении от детских площадок и зоны тихого отдыха.

Фото-зоны располагаются в репрезентативных точках территории набережной.

Адаптивные зоны для МГН (рис. 8, е) необходимо размещать по всей территории набережной в зависимости от цели их использования. Поверхность пешеходных дорожек и тротуаров, предназначенных для перемещения людей с ограниченными возможностями, должна быть максимально комфортной и безопасной. Ровное бесшовное покрытие не должно скользить даже при намокании. Незначительные перепады уровней следует выровнять.

Лучше всего для покрытия пешеходных зон, съездов, пандусов и лестниц использовать твердые материалы, которые обеспечивают ровную поверхность и не создают вибрации при движении по ним⁷.

Заключение

Архитектурно-ландшафтная организация набережной, соответствующая современным требованиям благоустройства, не только помогает решить инженерные задачи – укрепление берегов, но и способствует созданию экоустойчивой рекреационной среды для населения.

Резюмируя, следует отметить, что за последние несколько лет наблюдается тенденция к формированию комфортной рекреационной среды для человека. Одним из способов достижения этой цели является зонирование территории набережной с учетом современных потребностей человека.

Важно разработать осмысленную стратегию организации и преобразования общественных рекреационных зон набережных города. Это должно быть планомерное и поэтапное проведение работ по строительству и благоустройству прибрежных территорий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев М.В., Киселева Д.А., Бондарь Н.В., Пигин Ю.А. Принципы формирования городских общественных рекреационных зон набережных территорий // Вестник Томского государственного университета. Культурология и искусствоведение. 2019. № 33 С. 173–188.
2. Звегинцева А.А., Василенко М.И. Некоторые аспекты благоустройства прибрежных зон населенных пунктов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. Белгород, 2020. С. 289–293.
3. Краснов Р.К. Благоустройство набережных как фактор развития городской среды // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2020. № 12-1 (51). С. 148–150.
4. Баклаженко Е.В. Классификация и зонирование приречных территорий малых городов на примере Белгородской области // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 8. С. 61–68.
5. Хасанов Р.Р., Киносьян Н.С. Принципы архитектурно-градостроительной организации устойчивых городских набережных // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 38–46.
6. Подпорина П.С., Смолина О.О. Перспективы объёмно-пространственного и ландшафтного развития набережной города Комсомольск-на-Амуре // Актуальные вопросы обеспечения эксплуатационной надежности несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений : сборник статей межвузовской конференции, посвященной 60-летию научно-исследовательской лаборатории «Строительные конструкции». 2023.
7. Смолина О.О. Арборскульптура в визуально-коммуникационном пространстве города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 53–62.
8. Смолина О.О. Интегрирование бионических малых архитектурных форм в городской ландшафт // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 87–97.
9. Мирзякова К.Р. Оптимальный размер и наполнение площадок для выгула собак // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2022. № 3. С. 51–56.

⁷ Методические рекомендации по созданию доступной среды для инвалидов и других маломобильных групп населения / сост. О.Э. Замула; Министерство социального развития Республики Марий Эл. Йошкар-Ола: ООО «Винтаж», 2017.

10. *Налбандян А.В., Смолина О.О.* Организация площадок для выгула собак в городе Новосибирске // Всероссийская научно-практическая конференция, Красноярск, 23 декабря 2020 г. : сборник статей. Красноярск : Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2021. С. 32–35.

REFERENCES

1. *Savelyev M.V., Kiseleva D.A., Bondar N.V., Pigin Yu.A.* Principles of formation of urban public recreational zones on embankments. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie*. 2019; 33: 73–188. (In Russian)
2. *Zvegintseva A.A., Vasilenko M.I.* Aspects of improvement of coastal zones of settlements. In: Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Safety and Protection of Natural Environment: Fundamental and Applied Research'. Belgorod, 2020. Pp. 289–293. (In Russian)
3. *Krasnov R.K.* Embankment improvement as a factor of development of the urban environment. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2020; 12-1 (51): 148–150. (In Russian).
4. *Baklazhenko E.V.* Classification and zoning of embankments in small towns on the example of the Belgorod region. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2020; (8): 61–68. (In Russian)
5. *Khasanov R.R., Kinoyan N.S.* Principles of architectural and urban planning organization of city embankments. *Izvestia KGASU*. 2018; 2 (44): 38–46. (In Russian)
6. *Podporina P.S., Smolina O.O.* Prospects for the spatial and landscape development of the embankment of the city of Komsomolsk-on-Amur. In: Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Relevant Problems of Reliable Operation of Supporting and Enclosing Structures', 2023. (In Russian)
7. *Smolina O.O.* Tree shaping in visual communication of urban architecture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2020; 22 (1): 53–62. (In Russian)
8. *Smolina O.O.* Hardscaping integration in townscape. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2018; 20 (6): 87–97. (In Russian)
9. *Mirzyakova K.R.* Optimal size and filling of dog walking areas. *Akademicheskii vestnik URALNIIPROEKT RAASN*. 2022; (3): 51–56. (In Russian)
10. *Nalbandyan A.V., Smolina O.O.* Organization of dog walking sites in the city of Novosibirsk. In: Proc. All-Russ. Sci. Conf. Krasnoyarsk, 2021. Pp. 32–35.

Сведения об авторах

Подпорина Полина Сергеевна, магистрант, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, polina.podporina@mail.ru

Смолина Олеся Олеговна, канд. архитектуры, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, zelenoest-vo@mail.ru

Authors Details

Polina S. Podporina, Graduate Student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, polina.podporina@mail.ru

Olesya O. Smolina, PhD, A/Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, zelenoest-vo@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.12.2023
Одобрена после рецензирования 18.01.2024
Принята к публикации 15.05.2024

Submitted for publication 29.12.2023
Approved after review 18.01.2024
Accepted for publication 15.05.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 63–76.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 63–76.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.035.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-63-76

EDN: UBTTNL

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАНИРОВОЧНОЙ СТРУКТУРЫ Г. ТЮМЕНИ В XVII – ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВЕКА И ДЕРЕВЯННАЯ ЗАСТРОЙКА ПО «ОБРАЗЦОВЫМ» ПРОЕКТАМ

Виктория Викторовна Югай, Елена Владимировна Ситникова

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Рассмотрены этапы формирования регулярной планировочной структуры г. Тюмени под влиянием общероссийских государственных программ по развитию городов России в конце XVIII – первой половине XIX в. Выявлены общие тенденции проектирования и строительства деревянных зданий по высочайше утвержденным «образцовым» проектам в г. Тюмени. Типовое проектирование служило средством обеспечения быстрого и качественного строительства по всей стране. Это явление охватило почти все области проектирования и оказало значительное влияние на облик русских городов.

Актуальность исследования обусловлена проблемами сохранения исторической планировочной структуры Тюмени и деревянной исторической застройки, возведенной по «образцовым» проектам, получившей широкое распространение в русских городах в XIX в., а к настоящему времени находящейся на грани исчезновения.

Цель работы – изучение этапов формирования регулярной планировочной структуры г. Тюмени и анализ деревянной застройки, возведенной по «образцовым» проектам.

Новизна настоящего исследования заключается в проведенном комплексном анализе деревянной застройки, возведенной по «образцовым» проектам в г. Тюмени, выявлении основных типов домов по архитектурно-художественным характеристикам.

Методы исследования основываются на комплексном подходе, включающем: изучение архивных и библиографических источников; проведение натурного исследования; анализ и систематизацию результатов исследования, графоаналитический анализ, синтез информации при формировании выводов.

В результате исследования были проанализированы исторические регулярные планы г. Тюмени; выявлены деревянные дома, построенные по «образцовым» проектам, которые разделены на типы; определен наиболее распространенный тип такого деревянного дома.

Ключевые слова: регулярная планировка, «образцовое» строительство, деревянный классицизм, деревянная застройка Тюмени, архитектура Тюмени

Для цитирования: Югай В.В., Ситникова Е.В. Формирование планировочной структуры г. Тюмени в XVII – первой половине XIX века и деревянная застройка по «образцовым» проектам // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 63–76. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-63-76. EDN: UBTTNL

ORIGINAL ARTICLE

**PLANNING STRUCTURE IN TYUMEN
IN THE 17–19TH CENTURIES AND STANDARD PROJECTS
OF WOODEN ARCHITECTURE****Victoria V. Yugai, Elena V. Sitnikova***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The article deals with the formation stages of the planning structure of Tyumen under governmental programs of the development of Russian cities late in the 18th and early 19th centuries. General design and construction of wooden buildings according to standard projects are studied. Model design serves as a means of ensuring fast and high-quality construction in the country. This phenomenon covers almost all areas of design and significantly affects Russian cities. The relevance of research is conditioned by the problem of preserving the historical planning structure of Tyumen and wooden historical buildings, erected according to standard projects widely spread in Russian cities in the 19th century.

Purpose: The aim of the work is to study the formation of the planning structure in Tyumen and analyze wooden buildings built according to standard projects.

Methodology/approach: A comprehensive approach includes a study of archival and bibliographic sources, field research, analysis and systematization of research results, graphical analytical methods.

Research findings: Historical plans of Tyumen are analyzed. Wooden houses built according to standard projects are classified, the most common types of wooden houses are determined.

Originality: A comprehensive analysis of wooden buildings built in Tyumen according to standard projects, identification of the main architectural types of buildings.

Keywords: planning structure, construction, wooden classicism, wooden buildings, architecture, Tyumen

For citation: Yugai V.V., Sitnikova E.V. Planning structure in Tyumen in the 17–19th centuries and standard projects of wooden architecture. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26 (3): 63–76. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-63-76. EDN: UBTNL

Вплоть до последней четверти XIX в. развитие сибирских городов шло в соответствии с исторически определенными закономерностями и протекало как «естественный» процесс. На планировочную систему городов оказывали влияние такие факторы, как направление трактов и дорог, удобные выходы к рекам, пашням, выпасам, и особенно сложившийся рельеф местности. Они предопределили планировочную характеристику города, начертание улиц и кварталов, форму и положение площадей. Улицы шли обычно параллельно берегам рек и вдоль дорог, а транзитные дороги по мере роста городов превращались в главные улицы.

Сибирские города, как и большинство городов России, приобрели регулярную планировку в конце XVIII – первой половине XIX в. в результате общих государственных градостроительных мероприятий. Многие сибирские города получили планы в последней трети XVIII в.: Тюмень (1766 г.), Тобольск (1767 г.), Иркутск (1768 г.), Красноярск (1773 г.), Барнаул (1785 г.). Позднее, в 1829–1830 гг., утверждаются планы Омска и Томска [1].

Вопросы градостроительства городов Сибири рассматривались в трудах многих ученых и архитекторов: О.С. Ворониной, В.Т. Горбачева, А.А. Гудкова, Б.А. Жученко, С.П. Заварихина, В.Г. Залесова, Н.Н. Крадина, Н.П. Крадина, В.И. Крушлинского, Т.Н. Манониной, Б.И. Оглы, Т.М. Степанской, В.И. Царева и др.

Изучением застройки, возведенной по «образцовым» проектам, занимались исследователи Н.У. Бабинович, Е. Белецкая, М.С. Боцман, Н. Крашениникова, Н.В. Купрякова, Т.Н. Манонина, С.С. Ожегов, А.Ю. Олейник, Е.В. Ситникова, Т.Г. Туманик, Л. Чернозубова, И. Эрн и др.

К концу XVII в. в Тюмени проживало примерно 3000 чел. Самый ранний из всех известных планов Тюмени датируется 1604–1701 гг. и демонстрирует своеобразную особенность города – планировку, близкую к регулярной (рис. 1).

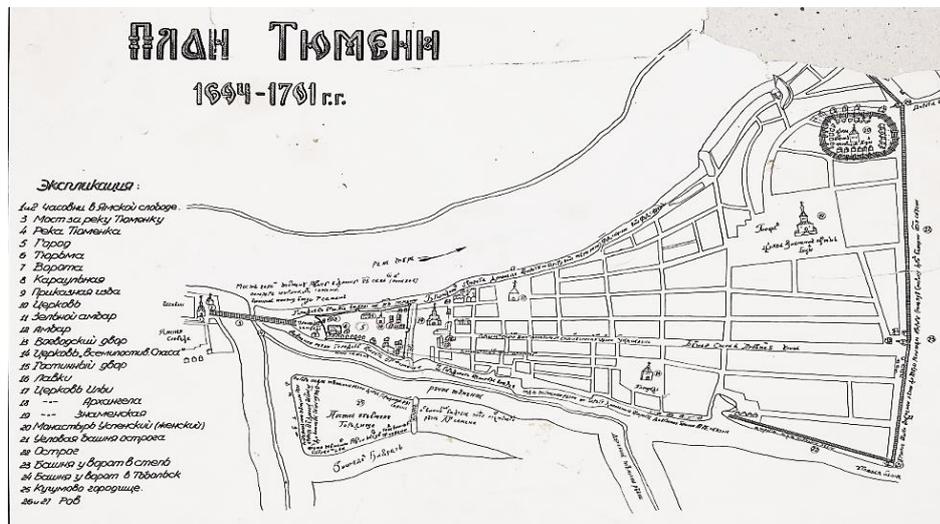


Рис. 1. Планировочная структура г. Тюмени на 1604–1701 гг.¹
Fig. 1. Planning structure of Tyumen for the years 1604–1701

Основным фактором, повлиявшим на регулярность планировочной структуры Тюмени, стал естественный ландшафт местности, а именно расположение крепости и посада на узком вытянутом мысу. Главная дорога (Московско-Сибирский тракт, совр. ул. Республики), проходившая через город, определила направление параллельных ей улиц, а перпендикулярные возникли как наиболее короткие пути между берегами р. Туры и р. Тюменки. Естественность тюменской городской планировочной структуры проявляется и в расширении кварталов в юго-восточной части города, т. е. там, где мыс естественным образом расширяется. Улицы, проходившие от крепости на юг, постепенно меняли свое направление от параллельных средней магистрали до береговой линии. Это придавало планировке сходство с радиальной, точнее, с трехлучевой схемой [2].

¹ URL: http://www.etomesto.ru/img_map.php?id=4543

Вторая половина XVIII в. была для Тюмени временем становления регулярной планировочной структуры. До 1766 г. город сохранял свою старую планировку. С его южной стороны еще проходили земляной вал и ров, стояли остатки острога, которые уже не имели практического значения и давно не обновлялись. Новый губернатор Сибири Д.И. Чичерин, занявший пост в 1763 г., застал город именно в таком состоянии. С его именем связано активное внедрение в сибирскую градостроительную практику принципов «регулярства» [2].

Если сравнить план Тюмени 1766 г. с планом конца XVII в., можно отметить, что при разработке регулярной планировки учитывались особенности уже сложившейся планировочной структуры, а также существовавшие высотные доминанты – церкви, колокольни. Основная планировочная ось города (часть Московско-Сибирского тракта) была сохранена – это бывшая Благовещенская улица (совр. ул. Республики). Площади вокруг церквей исчезли и были вовлечены в квартальную застройку (рис. 2).

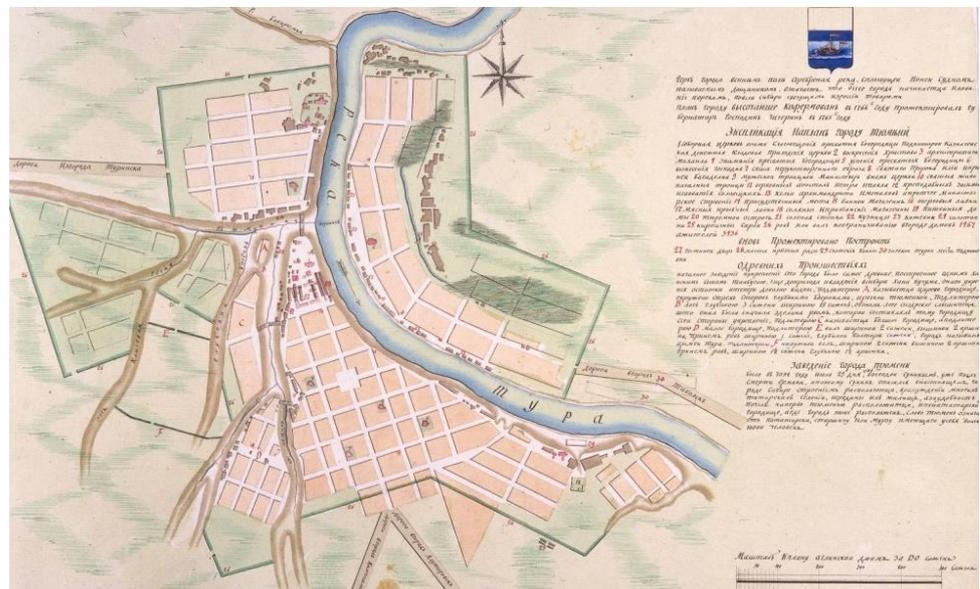


Рис. 2. Планировочная структура г. Тюмени 1766 г.²
Fig. 2. Planning structure of Tyumen for 1766

В 1808 г. Тюмень получила новый план (рис. 3), который в большей степени развивал промышленную часть города. Граница застройки по-прежнему проходила по ул. Голицынской (совр. Первомайской). Городища, Ямская слобода и левобережье к тому времени уже были застроены регулярно, по плану 1766 г.

Застройка городских кварталов осуществлялась по особым «Правилам для производства постройки домов», разработанным для Санкт-Петербурга в 1809 г. и распространенным в 1827 г. по всем городам России. В правилах также были прописаны ограничения, в основном касавшиеся деревянных домов, с целью

² URL: http://www.etomesto.ru/img_map.php?id=6715

предотвращения пожарных ситуаций. Деревянные здания предписывалось строить, «чтобы тесноты между строениями не было», с обязательным разрывом между ними в 4 сажени (8,5 м) и высотой не более 8 аршин (5,7 м) от фундамента. При «неудобности по тесноте места» или нежелании хозяина соблюсти такой разрыв или промежуток позволялось вместо разрыва устраивать брандмауэр, но следить за тем, чтобы «он безобразия в фасаде не делал» [3].



Рис. 3. Планировочная структура г. Тюмени 1808 г.³
Fig. 3. Planning structure of Tyumen, 1808

Большое влияние на архитектуру первой половины XIX в. оказали «образцовые» проекты, разработанные в Петербурге и ставшие обязательными для застройки всех провинциальных городов России.

«Собрание фасадов, его императорским величеством опробованных для частных строений в городах Российской империи» было выпущено в 1809–1812 гг. в пяти частях. Авторами проектов стали архитекторы А.Д. Захаров, Л. Руска, В.И. Гесте и В.П. Стасов. В два первых альбома (1809 г.) были включены городские обывательские дома разного размера и этажности, в третий – дома с лавками, флигели, различные хозяйственные строения и садовые постройки, в четвертый (1812 г.) – деревянные и каменные жилые дома (в том числе доходные и загородные), хозяйственные постройки и фабричные строения, а пя-

³ URL: <https://forum.vgd.ru/1789/62647/>

тый, дополнительный (1811 г.), содержал проекты «для заборов и ворот к частным строениям в городах» [4].

Собрание фасадов было призвано удовлетворить разнообразные потребности заказчиков и носило рекомендательный характер, но имело принцип: сохранить неизменное единство в стиле всех объектов, включенных в альбом.

Применение «апробированных» фасадов в сибирских городах имело свои особенности. Через два года после получения проектов сибирский губернатор обратился в Петербург с просьбой разрешить отступление от этих фасадов, поскольку даже самый скромный из них не отвечал материальным возможностям местных жителей. На 1814–1818 гг. по «апробированным» фасадам в городе не было построено ни одного здания. И только позднее, в 30–40-х гг. XIX в., когда в руках отдельных предпринимателей концентрируются крупные капиталы, начинают осуществляться эти проекты [5].

Застройку кварталов Тюмени в первой половине XIX в., выполненную по «образцовым» проектам, можно рассмотреть на примере известной усадьбы тюменского купца и городского головы Ивана Васильевича Иконникова на ул. Царской (совр. ул. Республики, 18–20) (рис. 4, 6, 7). В архитектурно-планировочном решении усадьбы прослеживаются характерные элементы «образцового» проекта № 67 из «Собрания фасадов, его императорским величеством опробованных для частных строений в городах Российской империи», 1809–1812 гг. (рис. 5).

Усадьба представляла собой комплекс из главного жилого дома (деревянного с обшивкой под каменный руст, на высоком кирпичном цоколе), фиксирующего угол квартальной застройки и выходящего на площадь продольным фасадом, боковые флигели (деревянные в три оси окон по уличным фасадам с щипцовыми крышами) выходили торцевыми фасадами на красную линию застройки улиц и формировали плотную периметральную застройку двора, за которым следовал двор с хозяйственными постройками (рис. 4, 6, 7).

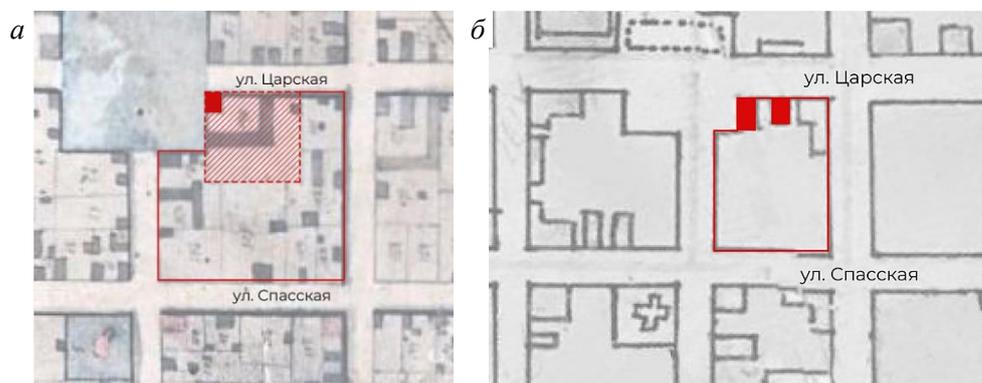


Рис. 4. Расположение усадьбы И.В. Иконникова в планировочной структуре квартала на 1849 и 1917-й гг.:

a – усадьба И.В. Иконникова в структуре квартала (фрагмент карты 1849 г.); *б* – усадьба С.И. Колокольникова в структуре квартала (фрагмент карты 1917 г.)

Fig. 4. I.V. Ikonnikov's estate in the planning structure for the years 1849 and 1917: *a* – in subdivision structure in 1849; *b* – in subdivision structure in 1917

В конце XIX в. усадьба перешла во владение купца первой гильдии С.И. Колокольникова, который в память о посещении усадьбы императором Александром II (в 1837 г.) перестроил её, придав более роскошный облик (рис. 8).

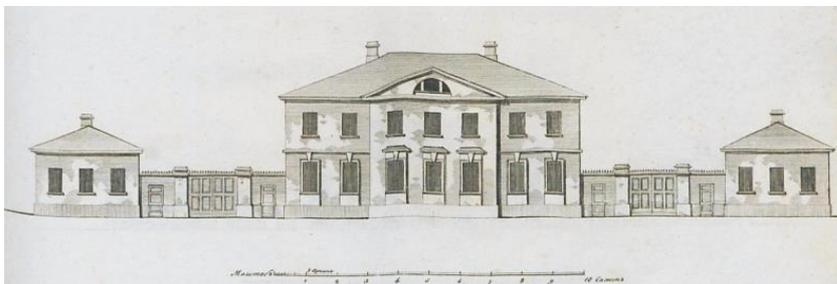


Рис. 5. «Образцовый» проект № 67 из «Собрания фасадов, его императорским величеством опробованных для частных строений в городах Российской империи», 1809–1812 гг.

Fig. 5. Project No. 67 from 'Collection of Facades Tried by His Imperial Majesty for Private Buildings in the Cities of the Russian Empire', 1809–1812



Рис. 6. Вид на усадьбу И.В. Иконникова. Автор фото К. Высоккий, 1898 г.

Fig. 6. I.V. Ikonnikov's estate. Photograph by K. Vysocky, 1898

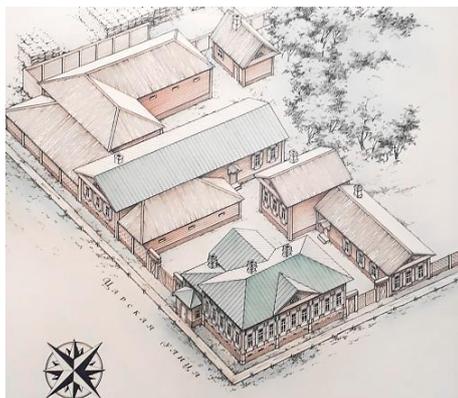


Рис. 7. Аксинометрический вид усадьбы И.В. Иконникова. Из музея «Усадьбы Колокольниковых» в г. Тюмени

Fig. 7. Axonometric view of I.V. Ikonnikov's manor from the Kolokolnikov Estates Museum in Tyumen

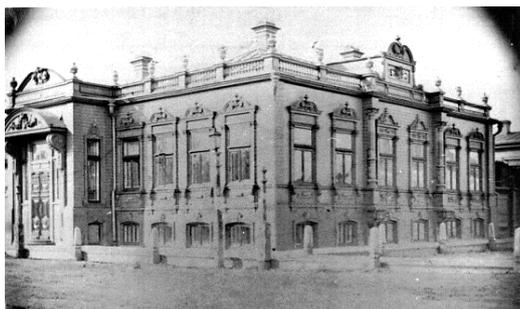


Рис. 8. Усадьба С.И. Колокольникова, 1890–1900 гг.

Fig. 8. S.I. Kolokolnikov's estate, 1890–1900

Фасады главного дома выполнили в стилистике неоклассицизма с элементами барокко и традиционной тюменской резьбы. Здание было расширено в глубину двора, парадный вход с ул. Царской закрыли. Однако сохранившийся козырёк на кронштейнах и симметричная композиция сильно высту-

пающего ризалита с узкими окнами, расположенными по бокам от центральной полукруглой ниши, выдают некогда существовавший здесь парадный вход. Ниша украшена резной деревянной раковиной, фронтоном – геральдической композицией, узкие окна по бокам ризалита увенчаны круглыми медальонами. Особый шарм постройке придают изящные резные вазоны парапетных столбиков и точёные балясины парапетного ограждения. Фасад по ул. Тургенева имеет симметричную трёхчастную композицию, главную ось подчёркивает фигурный фронтоном с барочными волютами, а пилястры, закрывающие врубки сруба, украшены резными деревянными колоннами стилизованного классицистического ордера [6].

Следует отметить, что применение «образцовых» фасадов приводило к выработке определенного стилового направления в застройке города. Из-за несоответствия местным климатическим условиям и экономическим возможностям застройщиков практическое использование «образцов» было затруднительно. Переработанные в различных вариантах и привязанные к привычным, сложившимся в Сибири объемно-планировочным приемам рубленых домов, такие постройки являлись результатом коллективного труда местных проектировщиков и видных столичных архитекторов, обретая в целом характерные черты, присущие всей отечественной архитектуре этого времени [7, с. 43].

В Тюмени, как и в других сибирских городах, в XIX в. деревянные постройки в стиле классицизм стали массовым явлением. Большой процент утраты подобных строений пришелся на советский период, поскольку такие дома считали фоновой застройкой, по сравнению с объектами эклектики, выделяющимися пышным декором. В настоящее время деревянная классицистическая застройка является наиболее древней и уже достаточно редкой, в связи с чем необходимо проведение исследовательских работ по её выявлению, изучению и систематизации [8, 9, 10].

В результате проведенных исследований в г. Тюмени выявлено 18 домов, соответствующих фасадам из альбомов 1809–1812 гг. Здания были разделены на 5 основных типов и приведены в таблице под следующими порядковыми номерами:

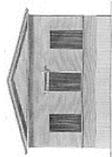
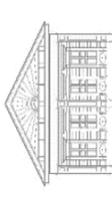
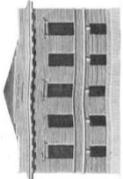
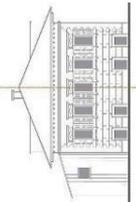
1. *Образцовый проект № 102 из альбома 1812 г.* Это одно-двухэтажный дом с шипцовой крышей на 3 оси окон.

В Тюмени подобный тип фасада встречается в три, но чаще в 4 оси окон. Высокий шипцовый фронтоном дополнен полуциркульным слуховым окном и обшит по типу лучей, имитируя солярный знак. Поле стены обшито широкой профильной доской под руст, углы оформлены пилястрами, лаконичные наличники со ставнями. Все дома имеют прирубы с входной группой. Подобного типа выявлено 7 домов, из них:

– в 3 оси окон (двухэтажные дома на ул. Свободы, 61/Полевая, 70; ул. Хохрякова, 33);

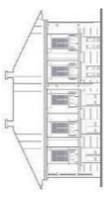
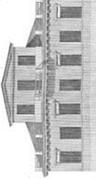
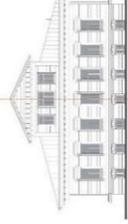
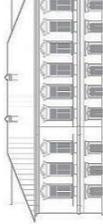
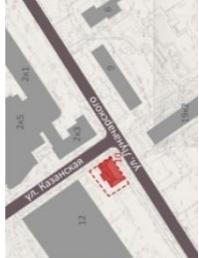
– в 4 оси окон (одноэтажный дом из усадьбы А.Н. Климшина на ул. Ф. Энгельса, 38; двухэтажный дом причта Михайло-Архангельской церкви на ул. Герцена, 17/Тургенева, 20; одноэтажный дом на цокольном этаже по ул. Луначарского, 31, и по ул. Комсомольской, 27; одноэтажный дом на ул. Казанской, 24).

Сводная таблица деревянных классицистических зданий, возведенных по «образцовым» фасадам в Тюмени
 Classical wooden houses built in Tyumen by standard facades

№ п/п	Тип «образцового» фасада	Чертеж фасада/крапкая характеристика	Ситуационная схема	Фото здания/ адрес объекта	Адреса выявленных объектов
1	 Образцовый проект № 102 из альбома 1812 г.	 Дома в 3–4 осей окон, одно-двухэтажные с щипцовыми крышами		 Жилый дом по ул. Свободы, 61/Полевая, 70  Жилый дом по ул. Комсомольской, 27	Дома в 3 оси окон: ул. Свободы, 61/Полевая, 70 ул. Полевая, 47 ул. Хохрякова, 33 Дома в 4 оси окон: ул. Ф. Энгельса, 38 дом причта Михайло-Архангельской церкви по ул. Герцена, 17/Тургенева, 20 ул. Луначарского, 31 ул. Комсомольская, 27 ул. Казанская, 24
2	 Образцовый проект деревянного дома № 23 из альбома 1812 г.	 Дом в 5 осей окон, двухэтажный (нижний этаж более низкий) с мутулами под вальмовой крышей		 Дом причта Вознесенской церкви по ул. Береговой, 77А (1860–1870 гг.)	Обшитые дома: Дом причта Вознесенской церкви по ул. Береговой, 77А

Вестник ТГАСУ. 2024. Т. 26. № 3

Окончание таблицы / End of table

№ п/п	Тип «образцового» фасада	Чертеж фасада/краткая характеристика	Ситуационная схема	Фото здания/ адрес объекта	Адреса выявленных объектов
3	 Образцовый проект деревянного строения № 9 из альбома 1812 г.	 Дома в 3–5 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий) под вальмовыми крышами		 Дом Е.И. Брызгалова по ул. Челюскинцев, 13 (1854)	Обшities дома: Дом Е.И. Брызгалова по ул. Челюскинцев, 13 Дом М.П. Ядрышников по ул. Челюскинцев, 20/Хохрякова, 18 Дома без обшивки: ул. Ямская, 43 ул. Ямская, 36
4	 Образцовый проект деревянного дома с мезонином № 82 1812 г.	 Дома с мезонином в 7–9 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий)		 Дом М.С. Керженцева по ул. Пристанской, 1 (1886)	Дом М.С. Керженцева по ул. Пристанской, 1 Дом Ф.И. Ушакова по ул. 25 Октября, 42/Орджоникидзе, 2 Усадьба Колокольниковых по ул. Челюскинцев, 1 Дом П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева по ул. Советской, 21/Дзержинского, 26
5	 Образцовый проект № 23 из альбома 1809 г.	 Дома в 7–9 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий) под вальмовыми крышами		 Усадьба Колокольниковых по ул. Луначарского, 10	Дом А.Я. Капитановой по ул. Кирова, 37/Ленина, 37 Усадьба Колокольниковых по ул. Луначарского, 10

2. *Образцовый проект № 23 из альбома 1812 г.* Двухэтажный дом с вальмовой крышей на 5 оконных осей с мутулами, первый этаж по высоте ниже второго.

Объекты такого типа имеют характерную для классицизма обшивку под руст, довольно большого выноса карниз с мутулами и филенчатые пилястры.

В Тюмени выявлен один дом такого типа – дом причта Вознесенской церкви по ул. Береговой, 77А.

3. *Образцовый проект № 9 из альбома 1812 г.* Одноэтажный дом на цокольном этаже или двухэтажный на 3–5 оконных осей.

Встречаются дома как обшитые, так и без обшивки. В Тюмени выявлено 4 объекта такого типа:

– с обшивкой: дом Е.И. Брызгалова по ул. Челюскинцев, 13; дом М.П. Ядрышников по ул. Челюскинцев, 20/Хохрякова, 18;

– без обшивки: жилые дома по ул. Ямской, 36 и Ямской, 43.

Главной особенностью является пониженный первый этаж (цокольный). Фасады имеют характерные классицистические черты: широкие подоконные доски с глухой резьбой или с заполнением полубалясинами, филенчатые пилястры, большой карниз с гладким подшивным фризом и т. д. Окна как верхнего, так и нижнего этажей имеют ставни.

4. *Образцовый проект № 82 из альбома 1812 года.* Дом с мезонином на 7–9 осей окон.

Подобного типа дома часто занимают угловое положение в планировочной структуре города. Мезонины встречаются как продольные, ориентированные на две стороны, так и крестовые, выходящие на 4 стороны дома. Декор отличается «классицистической» сдержанностью: наличники окон с прямыми профильными сандриками, филенчатые пилястры с капителями различной сложности, кованые кронштейны и ограждения балконов в мезонинах. Наиболее распространённым орнаментом в декоре (во фронтоне, на широких подоконных досках наличников) являются солярные знаки, выполненные в технике глухой резьбы [11].

С мезонинами сохранилось 4 объекта: дом М.С. Керженцева по ул. Пристанской, 1; дом Ф.И. Ушакова по ул. 25 Октября, 42/Орджоникидзе, 2; дом из усадьбы Колокольниковых по ул. Челюскинцев, 1; Дом П.Г. Катаева – М.Е. Дементьева по ул. Советской, 21/Дзержинского, 26.

5. *Образцовый проект № 23 из альбома 1809 г.* Одноэтажный дом на цокольном этаже или двухэтажный дом под вальмовой крышей на 7–9 оконных осей.

В Тюмени такой тип домов также имеет характерные классицизму черты: подоконные пояски с прямоугольными филенками, профилированный междуэтажный карниз, пониженный первый этаж (цоколь) и др.

Выявлено 2 объекта такого типа: дом А.Я. Капитановой по ул. Кирова, 37/Ленина, 37; дом из усадьбы Колокольниковых по ул. Луначарского, 10.

Заключение

Планировочная структура г. Тюмени изначально была близка к регулярной, ее формирование в целом происходило под влиянием общероссий-

ских государственных программ по развитию городов России в конце XVIII – первой половине XIX в. Однако здесь, как и в других городах страны, на этот процесс оказали влияние особенности природного ландшафта местности, формирование главной планировочной оси города вдоль транспортной магистрали общероссийского значения – Московско-Сибирского тракта и существующие городские доминанты (церкви и колокольни). Яркой особенностью планировочной структуры центрального исторического ядра Тюмени XVIII в. является разветвленная система оврагов, расположенная с востока от главного мыса, которая обуславливает характерный ландшафт и большое количество видовых точек с приовражных территорий.

Обязательное строительство зданий по «образцовым» проектам в России в XIX в. распространилось также и на деревянную застройку Тюмени. В результате проведенного натурного обследования на сегодняшний день в Тюмени было выявлено 18 объектов, построенных по «образцовым» фасадам, которые были разделены на 5 типов:

- дома в 3–4 оси окон, одно-двухэтажные с щипцовыми крышами;
- дом в 5 осей окон, двухэтажный (нижний этаж более низкий) с мутулами под вальмой крышей;
- дома в 3–5 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий) под вальмовыми крышами;
- дома с мезонином в 7–9 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий);
- дома в 7–9 осей окон, двухэтажные (нижний этаж более низкий) под вальмовыми крышами.

Наиболее распространенным является первый тип домов в 3–4 оси окон. Эти объекты небольшой площади, и большинство из них в настоящее время не эксплуатируются, поскольку являются функционально не востребованными инвесторами. Для их сохранения необходимо предложить научно обоснованные концепции использования, способные привлечь эффективных собственников и инвесторов, что, в свою очередь, даст возможность сохранить эту ценную застройку.

В целом следует отметить, что все выявленные объекты являются уникальными, поэтому их изучение и сохранение является важной и актуальной задачей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горбачев В.Т., Крадин Н.Н., Крадин Н.П., Крушлинский В.И., Степанская Т.М., Царев В.И. Градостроительство Сибири / Рос. акад. архит. и строит. наук, НИИ теории и истории архит. и градостроит. НИИТИАГ РААСН. Санкт-Петербург : Коло, 2011. 784 с.
2. Жученко Б.А., Заварихин С.П. Тюмень архитектурная. Свердловск : Сред.-Урал. кн. изд-во, 1984. 240 с.
3. Манонина Т.Н. Формирование застройки городов Западной Сибири в первой половине XIX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 3. С. 59–65.
4. Щёболева Е.Г., Рудченко В.М. Архитектура провинции // История русского искусства. Т. 14. Москва, 2012. С. 199, 201–202.
5. Ситникова Е.В., Олейник А.Ю. Классицизм в деревянной жилой архитектуре города Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 3 (44). С. 18–34. EDN: SEZIPJ

6. *Ситникова Е.В.* Историко-архитектурное наследие купцов Колокольниковых в г. Тюмени // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (51). С. 36–48. EDN: UDKOMP
7. *Оглы Б.И.* Строительство городов Сибири. Ленинград : Стройиздат (Ленингр. отд-ние), 1980. 272 с.
8. *Babinovich N.U., Sitnikova E.V.* Features of wooden buildings in Tomsk // Journal of Physics: Conference Series, Belgorod, 09–10 марта 2021 г. Belgorod : IOP Publishing Ltd., 2021. V. 1926. P. 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012042. EDN: PRQQYR
9. *Ситникова Е.В., Храмов А.Б.* Традиции классицизма в деревянной архитектуре исторических городов (на примере г. Тюмени) // Вестник славянских культур. 2023. № 69. С. 397–410. DOI: 10.37816/2073-9567-2023-69-397-410. EDN: CMDFLO
10. *Пухлякова М.Ю., Ситникова Е.В.* Деревянная архитектура Тюмени конца XIX – начала XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 32–46. EDN: YPMQCG
11. *Гайдук М.Ю., Клименко А.И., Порошин О.С.* Дома с мезонином в жилой застройке городов Тюменской области как объекты историко-культурного наследия (вторая половина XIX – начало XX в.). Краснодар : Издательский дом «ХОРС», 2021. С. 83–92.

REFERENCES

1. *Gorbachev V.T., Kradin N.N., Kradin N.P., Krushlinsky V.I., Stepankaya T.M., Tsarev V.I.* Urban planning of Siberia. Saint-Petersburg: Kolo, 2011. 784 p. (In Russian)
2. *Zhuchenko B.A., Zavarikhin S.P.* Tyumen architectural. Sverdlovsk: Sred. Ural. book publishing house, 1984. 240 p. (In Russian)
3. *Manonina T.N.* Urban development in Western Siberia in the 19th century. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010; (3): 59–65. (In Russian)
4. *Shcheboleva E.G., Rudchenko V.M.* Province architecture. In: The History of Russian Art, vol. 14. Moscow, 2012. Pp. 199, 201–202. (In Russian)
5. *Sitnikova E.V., Oleinik A.Y.* Classicism in wooden architecture of Tomsk city. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014; 3 (44): 18–34. EDN: SEZIPJ (In Russian)
6. *Sitnikova E.V.* Merchants Kolokol'nikov's historical and architectural heritage in Tyumen. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015; 4 (51): 36–48. EDN: UDKOMP (In Russian)
7. *Ogly B.I.* Construction of Siberian cities. Leningrad: Stroyizdat, 1980. 272 p. (In Russian)
8. *Babinovich N.U., Sitnikova E.V.* Features of wooden buildings in Tomsk. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1926: 012042. DOI: 10.1088/1742-6596/1926/1/012042. EDN: PRQQYR
9. *Sitnikova E.V., Khramtsov A.B.* Traditions of classicism in wooden architecture of historical cities (the Tyumen case studies). *Vestnik slavyanskikh kul'tur*. 2023; (69): 397–410. DOI: 10.37816/2073-9567-2023-69-397-410. EDN: CMDFLO (In Russian)
10. *Pukhlyakova M.Yu., Sitnikova E.V.* Wooden architecture of Tyumen late in the 19th and early 20th centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2018; 20 (1): 32–46. EDN: YPMQCG (In Russian)
11. *Gaiduk M.Yu., Klimenko A.I., Poroshin O.C.* Houses with mezzanine as objects of historical and cultural heritage in the Tyumen region in the 19–20th centuries). Krasnodar: "HORS", 2021. Pp. 83–92. (In Russian)

Сведения об авторах

Югай Виктория Викторовна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, uvvictory99@gmail.com

Ситникова Елена Владимировна, канд. архитектуры, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, elen-sivtomske@yandex.ru

Authors Details

Victoria V. Yugai, Undergraduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, uvvictory99@gmail.com

Elena V. Sitnikova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, elensivtomske@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.03.2024
Одобрена после рецензирования 10.04.2024
Принята к публикации 22.04.2024

Submitted for publication 29.03.2024
Approved after review 10.04.2024
Accepted for publication 22.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 77–93.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 77–93.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 726.025.4:2(571.16)

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-77-93

EDN: TINTAC

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕКРЫТИЙ В ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЯХ ТОМСКА КОНЦА XIX – НАЧАЛА XX В. НА ПРИМЕРЕ ГЛАВНОГО КОРПУСА ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

**Александр Алексеевич Кутуков, Лариса Степановна Романова,
Евгения Николаевна Колокольцева**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Исследуются конструктивные особенности междуэтажных и чердачных перекрытий главного корпуса бывшего Императорского Томского университета, построенного в 1878–1888 гг., их изменения и утраты в процессе эксплуатации и реставрации, проведенной в 1987–1991 гг.

Актуальность работы обусловлена имеющими тенденцию роста невосполнимыми утратами подлинных конструктивных элементов в процессе ремонтных и ремонтно-реставрационных работ на объектах культурного наследия и исторических зданиях Томска.

Цель исследования – изучить конструкции перекрытий главного корпуса бывшего Императорского Томского университета (с 1919 г. – Томского государственного университета), а также степень сохранности их подлинности после проведенных ремонтно-реставрационных работ.

В процессе исследования применялся комплексный подход: анализ литературы и других источников, общего состояния исследуемых конструкций до и после реставрации.

Впервые проведен анализ степени сохранности подлинных конструкций междуэтажных и чердачных перекрытий на исследуемом объекте после проведения ремонтно-реставрационных работ и введены в научный оборот проектные и фиксационные чертежи, фотографии конструкций, сделанные в процессе реставрации.

Теоретическая значимость исследования заключается в выявлении конструктивных особенностей междуэтажных и чердачных перекрытий главного корпуса первого в Сибири университета и анализе результатов проведенных реставрационных работ.

Практическая значимость – в возможности использования результатов исследования при проведении ремонтно-реставрационных работ на общественных каменных объектах Томска.

Ключевые слова: памятник архитектуры, исторический объект, подлинность, междуэтажные и чердачные перекрытия, сохранение, реставрация

Для цитирования: Кутуков А.А., Романова Л.С., Колокольцева Е.Н. Конструктивные особенности перекрытий в общественных зданиях Томска конца XIX – начала XX в. на примере главного корпуса Томского государственного

университета // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 77–93. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-77-93. EDN: TINTAC

ORIGINAL ARTICLE

FLOOR STRUCTURE IN PUBLIC HOUSES IN TOMSK IN 19–20th CENTURIES (THE TOMSK STATE UNIVERSITY BUILDING CASE STUDIES)

Alexander A. Kutukov, Larisa S. Romanova, Evgeniya N. Kolokoltseva
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The article studies the structural features of the floor and attic ceilings of the main building of the former Tomsk Imperial University built in 1878–1888 and their changes during the operation and after restoration in 1988–1991. The relevance is conditioned by the tendency of irreparable losses of authentic structural elements during repair and restoration of cultural heritage objects and historical buildings in Tomsk.

Purpose: The aim of the research is to study the floor structures of the main building of the former Imperial University in Tomsk (since 1919 Tomsk State University), as well as the degree of preservation of their authenticity after repair and restoration works.

Methodology/approach: The literature review; exploration of the general state of structures before and after restoration.

The article is the first to analyze the degree of preservation of the authentic structures of the interstorey and attic ceilings at the investigated object after the repair and restoration works and to introduce into scientific circulation design and fixation drawings, photographs of the structures in the process of restoration. Identification of structural properties of the floor and attic ceilings of the main building of the first university in Siberia and the analysis of restoration.

Practical implications: Research results can be used in carrying out repair and restoration of public houses in Tomsk.

Keywords: church, temple, religious building, architectural monument, preservation, architecture, restoration, cultural layer, waterlogging, vertical planning, waterproofing

For citation: Kutukov A.A., Romanova L.S., Kolokol'tseva E.N. Floor structure in public houses in Tomsk in 19–20th centuries (the Tomsk State University building case studies). Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 77–93. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-77-93. EDN: TINTAC

Введение

Актуальность статьи обусловлена имеющими тенденцию роста невосполнимыми утратами подлинных конструктивных элементов в процессе ремонтных и ремонтно-реставрационных работ на объектах культурного наследия и исторических зданиях Томска. Конструкции перекрытий являются закрытыми и в большинстве случаев недоступными для обследования до начала ремонтно-реставрационных работ, что влечёт за собой отсутствие информации об их конструктивных особенностях, соответствующих периоду постройки.

Цель исследования – изучить конструкции перекрытий главного корпуса бывшего Императорского университета в г. Томске, ныне Томского госу-

дарственного университета (ТГУ), построенного в 1878–1888 гг., а также степень сохранности подлинных междуэтажных и чердачных перекрытий после проведённых в 1987–1991 гг. ремонтно-реставрационных работ. В процессе исследования применялся комплексный подход: анализ литературы (книг и пособий по строительному искусству конца XIX – начала XX в.), чертежей и фотографий СИ «Сибспецпроектреставрация» (г. Томск), что позволило изучить конструкции, характерные для исследуемого периода, а также их общее техническое состояние до и после реставрации.

Впервые проведён анализ степени сохранности подлинных конструкций междуэтажных и чердачных перекрытий на исследуемом объекте после выполнения ремонтно-реставрационных работ и введены в научный оборот проектные и фиксационные чертежи, фотографии конструкций, выполненные в процессе реставрации.

Теоретическая значимость исследования заключается в выявлении конструктивных особенностей междуэтажных и чердачных перекрытий главного корпуса первого в Сибири университета и анализе результатов проведённых реставрационных работ.

Практическая значимость работы – это возможность использования результатов исследования при проведении ремонтно-реставрационных работ на общественных каменных объектах Томска.

Томский государственный университет является крайне интересным с инженерной точки зрения объектом. Это первый в Сибири университет, являющийся образцом применения классических и проверенных временем строительных приёмов при возведении учебных заведений нового по тем временам типа – комплекса из нескольких отдельных корпусов, при возведении которого были также применены самые новые достижения в области строительства, например железобетон. Опыт проектирования ТГУ впоследствии был использован при строительстве других высших и средних учебных заведений Томска и России.

Краткая история строительства ТГУ

В 1878 г. Александр II утвердил город Томск для строительства первого в Сибири университета с четырьмя факультетами: историко-филологическим, физико-математическим, юридическим и медицинским. Решению открыть университет в Томске способствовал врач В.М. Флоринский, убедительно изложивший в своей статье для Министерства народного просвещения все преимущества Томска, но из-за влияния противников такого решения, финансовых и кадровых сложностей вместо 4 планируемых факультетов был открыт изначально только один – медицинский. Для него пришлось в спешке достраивать клиники и переоборудовать другие корпуса. Так, например, химический корпус был переделан под анатомический.

Автором финального проекта стал архитектор-академик А.К. Бруни, строительством руководил гражданский инженер М.Г. Арнольд, а с 1881 г. – инженер-архитектор П.П. Наранович. Для строительства был выделен участок, окружённый берёзовой рощей, в районе Елань. 26 августа 1880 г. состоялась торжественная закладка университета. Пожертвования на строительство

и стипендии выделили советник П.Г. Демидов, купец и золотопромышленник З.М. Цибульский, предприниматель и меценат А.М. Сибиряков, семья купцов Кухтериных и даже жители других городов. Открытие университета состоялось 25 мая 1888 г. [1, 2].

Во время Второй мировой войны (1941–1943 гг.) в главном корпусе размещался Красногорский оптико-механический завод, который изготавливал артиллерийские, минометные прицелы и прочие приборы.

В 1998 г. ТГУ указом Президента РФ включен в Государственный свод особо ценных объектов культурного наследия народов Российской Федерации. В апреле 2010 г. вуз получил статус национального исследовательского университета. Здание главного корпуса ТГУ является памятником федерального значения, согласно Постановлению Совета Министров РСФСР № 624 от 4 декабря 1974 г.

После десяти переименований с 2014 г. университет официально значится как Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» [3].

Выявленные подлинные конструкции междуэтажных перекрытий

В плане здание первого корпуса можно условно разделить на пять объёмов: один – по центру и два – симметрично по обеим сторонам, пронумерованные цифрами от I до V (рис. 1).

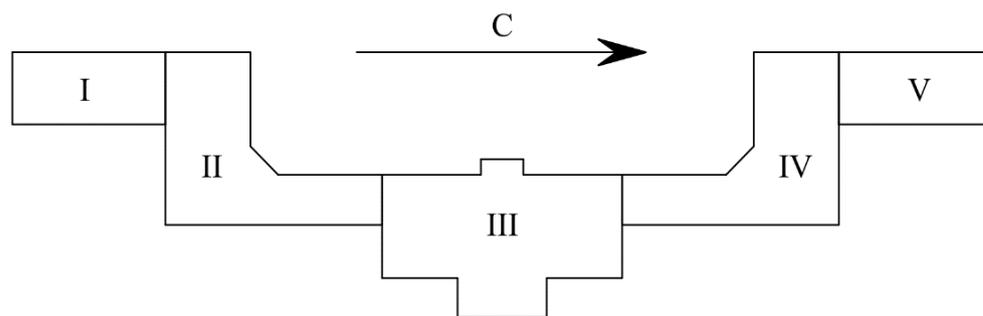


Рис. 1. План-схема деления на объёмы главного корпуса Томского государственного университета

Fig. 1. Schematic division of the main building of Tomsk State University

В 1987–1991 гг. специалистами СИ «Сибспецпроектреставрация» было проведено обследование конструкций главного корпуса ТГУ с последующими комплексными ремонтно-реставрационными работами, затронувшими большое количество элементов здания, в том числе междуэтажных и чердачных перекрытий, потребовавших решения сложной инженерной задачи по их правильной и безопасной замене и усилению. Указания специалистов СИ «Сибспецпроектреставрация» по демонтажу перекрытия [4] включают в себя конструкцию исторического междуэтажного перекрытия по деревянным балкам, зафиксированную до начала ремонтно-реставрационных работ (рис. 2).

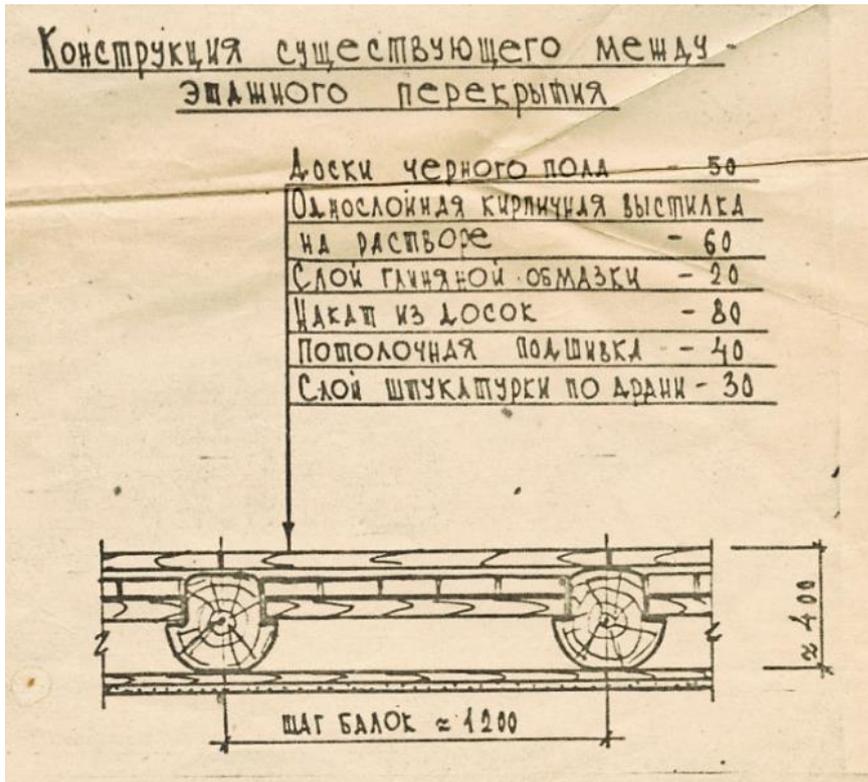


Рис. 2. Схематический разрез первоначального междуэтажного перекрытия по деревянным балкам главного корпуса ТГУ из научно-проектной документации СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г.

Fig. 2. Schematic cross-section of initial floor on wooden beams of the TSU main building. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1987

Перекрытие представляло собой деревянные балки с шагом около 1200 мм, что соответствует рекомендациям инженера В.Р. Бернгарда и составляет $\frac{2}{3}$ морской сажени [5], со специальной рубленой выпазовкой по краям для устройства настила из досок толщиной 80 мм. По классической схеме, если рассматривать поперечное сечение балки, то отношение ширины a к высоте h принималось как 5:7, а отношение высоты полки к общей высоте сечения как 1:3 (рис. 3). Деревянный настил был покрыт кирпичной выстилкой (60 мм) на растворе и на слое глиняной обмазки (20 мм). Выше смонтированы доски черного пола (50 мм) с последующей конструкцией чистого пола из каменных плит или деревянного паркета [6]. Конструкция является классической, но имеет свои особенности. Так, в качестве заполнения межбалочного пространства, снижающего шум и потери тепла, обычно применялась смесь соломы или мха с глиной, прокалённая

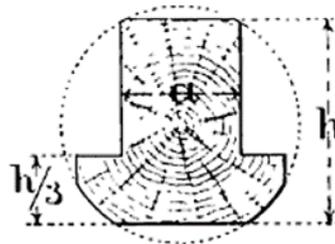


Рис. 3. Схема подтёски бревна для перекрытий [5]

Fig. 3. Schematic of slab timber undercutting [5]

земля или песок около 3 вершков (12–14 см) толщиной, но на данном объекте применён лежащий плашмя кирпич. Таковую же конструкцию перекрытия можно найти в трудах гражданского инженера М.Е. Романовича [7]. О кирпичной выстилке с установкой кирпича на ребро как средства теплоизоляции потолка упоминает В.Р. Бернгард, отмечая нецелесообразность такого метода [5]. В.Г. Залесский предлагает кирпичную выстилку как меру защиты чердачного перекрытия от пожаров, также отмечая грузность такой схемы [8]. Описание кирпичной выстилки также есть у Н.И. де-Рошенфора в примере расчёта деревянных балок, однако без подробностей.

Снизу по балкам была устроена деревянная потолочная подшивка (40 мм), оштукатуренная по дранке (30 мм). Примерная толщина перекрытия 400 мм. Диаметр бревна, согласно дореволюционным регламентам, должен составлять как минимум $\frac{1}{24}$ от пролёта или 2 вершка на каждую сажень длины (прим. 9 см на 1,83 м) [5, 9].

Прочность конструкции и материалов перекрытий рассчитывалась исходя из способности выдерживать собственный вес и временную нагрузку. На рис. 4 приведены данные по допускаемым временным нагрузкам из краткого руководства строительного искусства Брониша и Фишера, переведённые в систему СИ [10]. А из книг инженеров-архитекторов Н.И. Де-Рошенфора и М. Зиборова можно вычислить расчётные значения временного сопротивления древесины, на которые ориентировались в конце XIX – начале XX в. (рис. 5) [9, 11].

Категория помещения	Исторические значения нагрузки	Пересчёт на современные единицы
Для жилых домов	От 42 до 45 п./сажень ²	153-164 кг/м ²
Для танцевальных залов, классов и пр.	От 70 до 85 п./сажень ²	255-310 кг/м ²
Для библиотек	От 150 до 180 п./сажень ²	546-655 кг/м ²
Вес самого перекрытия	Около 7.5 п./аршин ²	246 кг/м ²

Рис. 4. Наибольшие допускаемые временные нагрузки на горизонтальные конструкции, значения 1914 г. [10]

Fig. 4. Maximum allowable temporary loads on horizontal structures, 1914 [10]

П О Р О Д А.	Среднее временное сопротивление:					
	Разрыву.		Раздроблению.		Скалыванию.	
	Кил. на 1 квадрат. сантим.	Пуды на 1 кв. дюймъ.	Кил. на 1 квадрат. сантим.	Пуды на 1 кв. дюймъ.	Кил. на 1 квадрат. сантим.	Пуды на 1 кв. дюймъ.
Дубъ	1152	454	563	222	79	31
Береза.	1112	442	574	226	41	16
Сосна	975	384	492	194	38	15
Ель	785	311	414	163	33	13

Рис. 5. Таблица значений временных сопротивлений для древесины [11]

Fig. 5. Temporary resistance values for wood [11]

«Прочное сопротивление» (вероятно, аналог современного понятия расчётного сопротивления) принималось как 1/10 от полного (включая временное), при этом значение сопротивления на изгиб приравнивается к средней величине сопротивлений на сжатие и растяжение [9].

Для сохранения древесины балок перекрытий в теле стены их концы покрывались густой смолой с оборачиванием войлоком; применяли только хорошо высушенную древесину. Для обеспечения совместной со стенами работы деревянные балки перекрытия через одну фиксировались с помощью металлических скоб, заанкеренных в стены во время строительства и повышающих общую жёсткость конструкции (рис. 6, 7). Подобная схема описана у М.Е. Романовича [7], В.Г. Залесского [8] и у В.Р. Бернгарда [5], но его конструкция немного отличается.



Рис. 6. Деревянное междуэтажное перекрытие с металлической скобой. ТГУ, I объём. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г., автор В.А. Кондратьев
Fig. 6. Wooden floor with metal bracing. TSU. Adopted from design documentation of "Sibspetsproektrestavratsiya", 1987

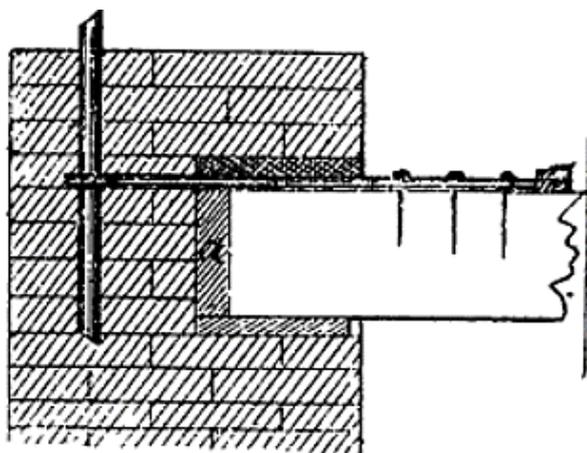


Рис. 7. Схема фиксации балок перекрытия в гнезде с помощью металлических анкеров и скоб, 1904 г. [8]
Fig. 7. Schematic of fixing floor joists in a socket using metal anchors and brackets, 1904 [8]

Кроме того, в стенах были установлены связи из кованных железных пластин – тяжи (рис. 8, 9). Такие связи препятствовали местным отклонениям высоких стен и воспринимали растягивающее усилие до набора прочности известкового раствора. Обычно для таких целей применяли кованое или позже прокатное железо толщиной от $\frac{1}{2}$ до $\frac{5}{8}$ дюйма (1,27–1,6 см) и шириной от $2\frac{1}{2}$ до 3 дюймов (6,35–7,62 см), располагая связи на уровне пола и на расстоянии в полкирпича от наружной стены. Каждая полоса была снабжена на концах проушинами и металлическими соединяющими штырями, натяжение производилось с помощью клиньев.



Рис. 8. Металлическая кованая затяжка. ТГУ. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г., автор В.А. Кондратьев

Fig. 8. Metal forged puff. TSU. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1987

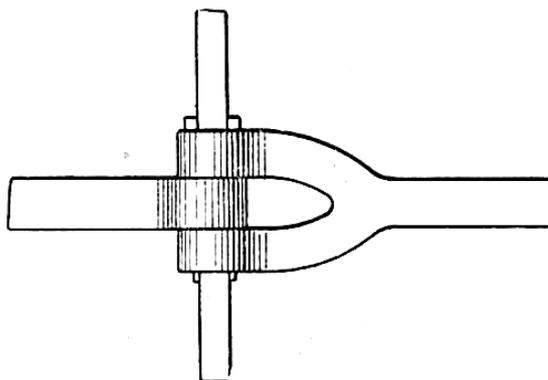


Рис. 9. Схема металлической затяжки. Курс гражданской архитектуры, 1903 г. [5]

Fig. 9. Metal puff. Course in Civil Architecture, 1903 [5]

Для деревянных перекрытий существовало правило: они не должны были контактировать с печами. В зависимости от конфигурации печей – идут они сквозь этажи или расположены только на одном – применялись различные методы дистанцирования балок перекрытия. В первом случае конструкция перекрытий включала опорный ригель, огораживающий печь. В ТГУ отопление было устроено конвекционным способом из подвала, но в некоторых помещениях имелись свои небольшие печи, для опоры которых были устроены консоли из кованых металлических полос, заанкеренные в тело стены (рис. 10, 11).

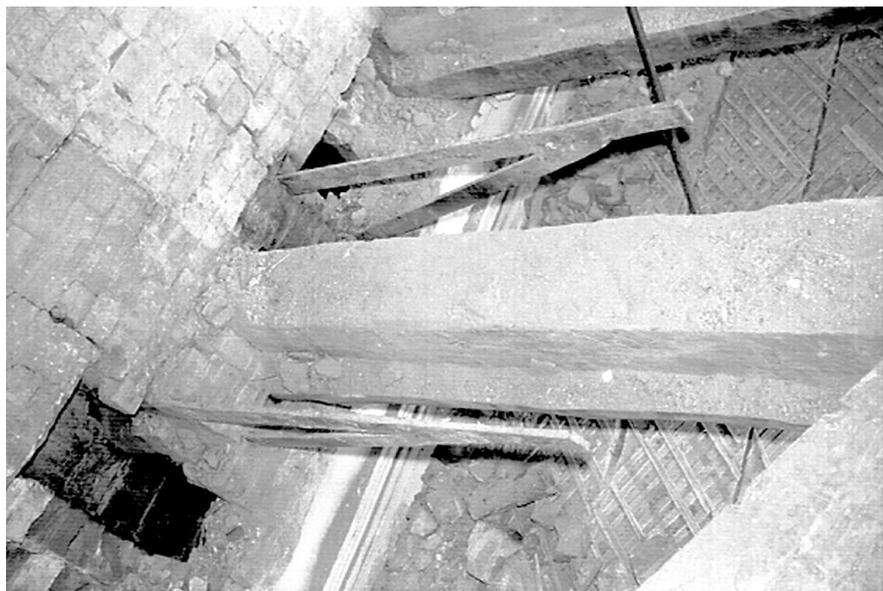


Рис. 10. Поддерживающий элемент консольного типа в подлинной конструкции междуэтажного перекрытия ТГУ. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г., автор В.А. Кондратьев

Fig. 10. Supporting element of cantilever in the authentic floor structure. Adopted from design documentation of "Sibspetsproektrestavratsiya", 1987

В период Второй мировой войны здание было приспособлено под завод, и в него эвакуировали технику (до 90 % площадей ТГУ было отдано под нужды фронта). От воздействия повышенных длительных нагрузок и появления связанных с нарушениями условий эксплуатации очагов биопоражений многие деревянные балки перекрытия снизили свою несущую способность (рис. 12, 13) и требовали ремонта или замены, что подробнее рассмотрено далее.

Сохранились фотографии сводчатого перекрытия по металлическим балкам или по конструкции прусского свода (рис. 14).

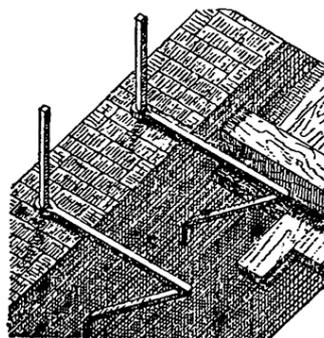


Рис. 11. Схема опорного кронштейна под печь, 1916 г. [9]

Fig. 11. Supporting bracket for a heating stove, 1916 [9]

Согласно планам размещения элементов перекрытий, сводчатые перекрытия находились в I, III и V объёме, а также часто применялись в подвальных помещениях.



Рис. 12. Деструкция балок перекрытия в местах опоры. ТГУ. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г., автор В.А. Кондратьев

Fig. 12. Destruction of floor beams near support. TSU. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratiya", 1987



Рис. 13. Деструкция балок перекрытия в их средней части. ТГУ. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1987 г., автор В.А. Кондратьев

Fig. 13. Floor destruction at the middle. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratiya", 1987



Рис. 14. Сводчатое перекрытие. Фото из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.
Fig. 14. Vaulted ceiling. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratiya", 1988

При устройстве подобных перекрытий руководствовались несколькими требованиями: шаг металлических балок, часто железнодорожных рельс (рис. 15), составлял $1\frac{1}{4}$ – $2\frac{1}{4}$ аршина (0,9–1,6 м), пролёт – не больше $1\frac{1}{2}$ сажени (2,67 м). Высота подъёма зависела от оказываемой на перекрытие нагрузки [5]. Также в главном корпусе ТГУ присутствуют крестовые своды над подвальными помещениями, но материалов по реставрации данных участков не обнаружено.

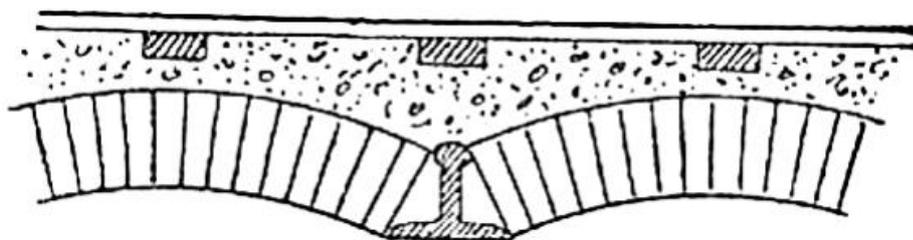


Рис. 15. Кладка прусских сводов по рельсам, 1903 г. [12]
Fig. 15. Prussian masonry vaulting on rails, 1903 [12]

Внесённые изменения в конструкции перекрытий в процессе ремонтно-реставрационных работ

Учитывая возросшие нагрузки в период с 1941 по 1943 г. и техническое состояние конструкций перекрытий главного корпуса ТГУ, было необходимо провести их замену или усиление. В ремонтно-реставрационных работах ру-

ководствовались принципом максимального сохранения исторических материалов и конструкций. Так, для помещения музея, где деревянные балки сохранились в относительно работоспособном состоянии, было проведено только уменьшение шага балок дополнением металлических балок с сохранением исторической отметки пола, соответствующего напольного покрытия без демонтажа исторических перегородок. На участках, требующих замены повреждённых элементов, в качестве новых балок перекрытия, согласно расчётам, были применены металлические двутавры и швеллеры на всю длину пролётов с шагом в среднем по 1200 мм так, чтобы опорные участки балок приходились в те же гнезда, куда исторически опирались деревянные (рис. 16). Данные конструктивные решения максимально проработаны и выполнены профессиональными ремонтными и реставрационными организациями с учётом всех требований к работе над историческими зданиями.

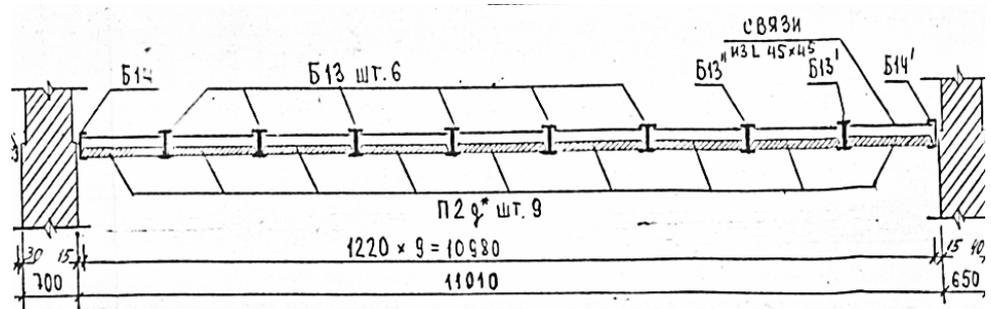


Рис. 16. Схема размещения балок нового перекрытия в II объёме ТГУ. Чертёж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 16. Arrangement of the new floor. Adopted from design documentation of "Sibspetsproektproektrestartavratsiya", 1988

Промежутки между балками заполнены гидро- и звукоизоляцией (рубероид и минераловатные плиты) на железобетонных плитах (70 мм), выполненных по особому заказу в опалубке стандартных канальных плит, оштукатуренных с армированием металлической сеткой по низу. Специально для монтажа сетки в конструкцию перекрытия между плит заранее были заложены специальные крюки $\varnothing 6$ мм, а также крюки $\varnothing 14$ мм для подвешивания люстр. Швы между плитами заполнены цементно-песчаным раствором. Сверху по металлическим балкам выполнен деревянный пол классической конструкции с выборкой пазов в лагах под балки перекрытия. Схема представлена на рис. 17.

Для распределения нагрузки на стены под опорные участки балок предусмотрены специальные разгружающие площадки из укрытого швеллером кирпича. Внешние стены, ввиду замены балок перекрытий на более теплопроводные, дополнительно утеплены (рис. 18).

Участки между плитами в промежутках между балками, где оставалось расстояние меньше ширины одной плиты, бетонировались как монолитные (рис. 19). На некоторых участках для повышения прочности вместо двутавровых балок ставили соединённые друг с другом швеллеры с увеличенными полками (рис. 20).

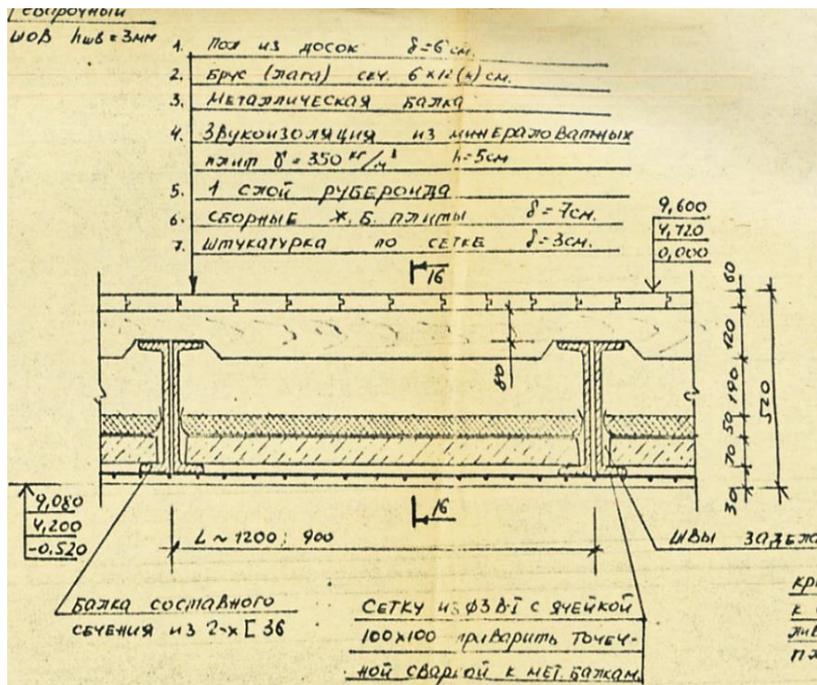


Рис. 17. Конструкция междуэтажного перекрытия, V объем. Чертеж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 17. Floor structure. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1988

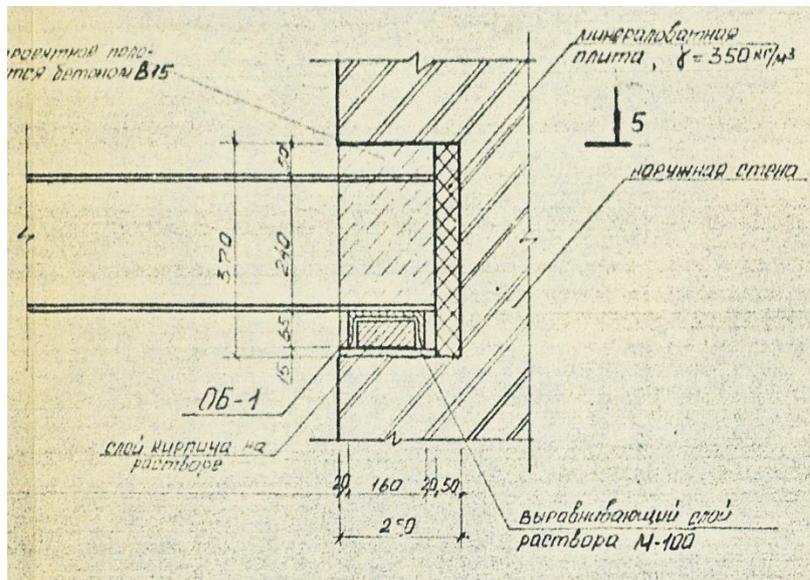


Рис. 18. Узел опирания балки перекрытия во внешней стене. Чертеж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 18. Floor resting in the outer wall. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1988

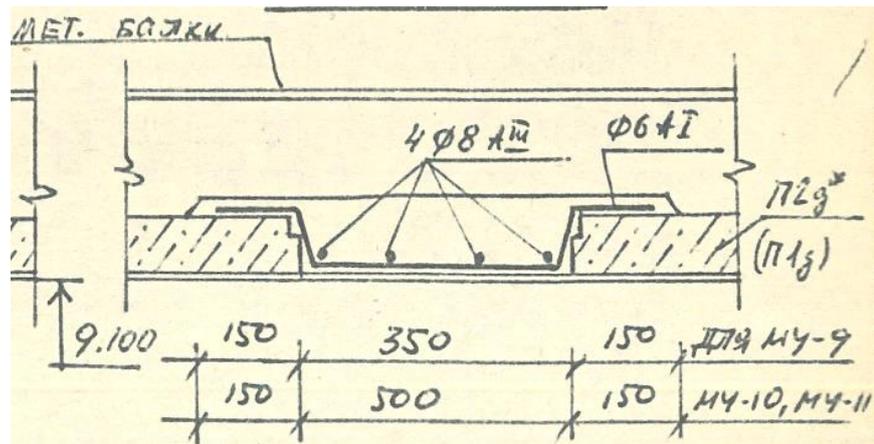


Рис. 19. Конструкция монолитного участка перекрытия, V объём. Чертёж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 19. Construction of monolithic slab section, V volume. Drawing from the archive of SI "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1988

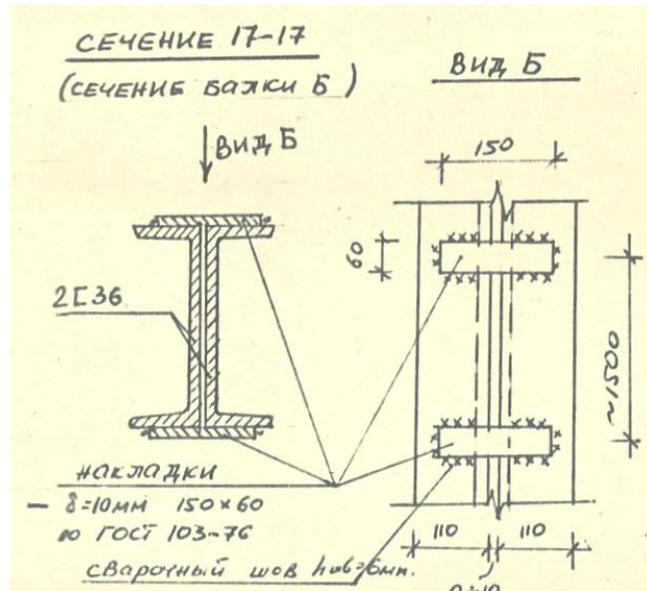


Рис. 20. Узел балки перекрытия из двух швеллеров с увязывающими накладками. Чертёж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 20. Floor beam assembly made of two channels with tie plates. Adopted from the archive of "Sibspetsproekproektrestavratsiya", 1988

Кроме того, монолитными делали участки с углами примыкания стен, значительно отличающимися от угла в 90° , характерные для II и IV объёмов (см. рис. 1). В данном случае для опоры были смонтированы дополнительные швеллеры № 36 вдоль стены. Все балки также соединялись между собой металлическими связями (уголок 45, стенка 5 мм).

Для чердачного перекрытия было выполнено утепление керамзитовым гравием (210 мм) со специальными «рёбрами», предотвращающими возникновение мостиков холода по металлическим балкам (рис. 21).

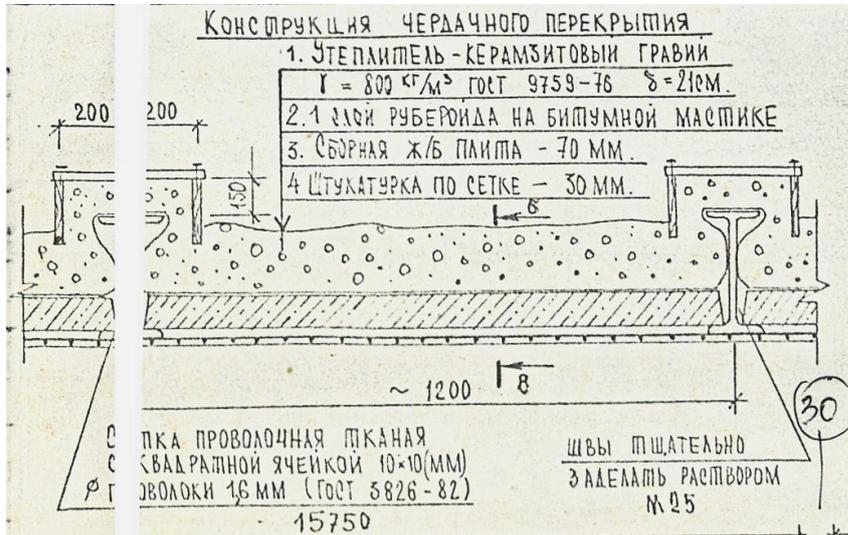


Рис. 21. Конструкция чердачного перекрытия, III объём. Чертёж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.

Fig. 21. Attic slab structure. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratiya", 1988

Некоторые балки, согласно расчёту, выполнялись из двутавров или парных швеллеров с приваренными к ним полосами прокатной стали 200×12 мм с различным устройством стыков на сжатом и растянутом участках (прямой и под углом 45° соответственно) с целью увеличения длины сварного шва и повышения его общей надёжности и прочности (рис. 22).

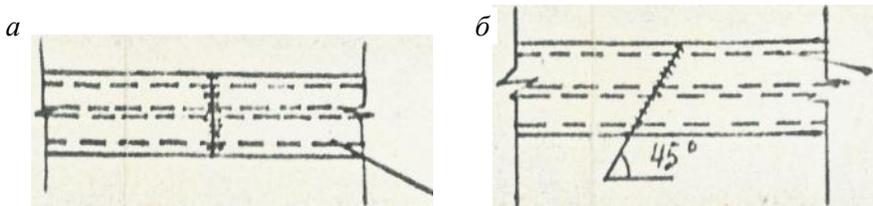


Рис. 22. Схема сварки в местах стыка металлических балок перекрытия. Чертёж из архива СИ «Сибспецпроектреставрация», 1988 г.:

a – в сжатом участке; *б* – в растянутом участке

Fig. 22. Welding joints of metal floor beams. Adopted from design documentation of "Sibspetsproekproektrestavratiya", 1988:

a – compressed section; *b* – stretched section

Выводы

Особенности исторических конструкций обусловлены техническими и материальными ограничениями времён постройки:

1. В результате исследования выявлено, что в здании главного корпуса Томского государственного университета (ранее Императорского университета) в междуэтажных и чердачных перекрытиях применены конструкции, характерные для периода постройки конца XIX – начала XX в. в России, но со своими особенностями – кирпичной выстилкой в междуэтажных перекрытиях.

2. Вследствие длительного увеличения нагрузки в связи с изменением функции в годы Второй мировой войны, а также последующих нарушений условий эксплуатации с частыми замачиваниями, подлинны конструкции перекрытий были значительно повреждены, поэтому потребовалось проведение комплексных ремонтно-реставрационных работ в 1988–1991 гг. Балочные междуэтажные перекрытия на различных участках были заменены, усилены или дополнены. Сводчатые междуэтажные перекрытия сохранились. Все исследовательские и проектные работы выполнены инженерами-реставраторами специализированного института «Сибспецпроектреставрация». Под их надзором выполнены ремонтно-реставрационные работы, способствующие максимально возможному сохранению исторических конструкций главного корпуса Томского государственного университета в условиях современной эксплуатации.

3. Сохранившиеся подлинные конструкции сводчатых перекрытий являются ценным примером конструкций перекрытий в общественных каменных зданиях конца XIX – начала XX в. в России и могут использоваться для изучения и реставрации аналогичных конструкций в других зданиях этого периода постройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Попов М.Ф.* Краткий исторический очерк Томского университета: за первые 25 лет его существования (1888–1913 гг.). Томск : Типо-литография Сибирского товарищества печатного дела, 1917. 544 с.
2. *Залесов В.Г.* Архитекторы Томска (XIX – начало XX века). Томск : Изд-во ТГАСУ, 2004. 168 с.
3. *История названия ТГУ // ТГУ* : [официальный сайт]. URL: https://www.tsu.ru/university/tsutoday/istoriya_nazvaniya_tgu.php (дата обращения: 20.03.2024).
4. *Указания по демонтажу перекрытий // Томск*, натурное обследование Томского государственного университета. Б. и., 1987.
5. *Бернгард В.Р.* Курс гражданской архитектуры. Санкт-Петербург : Тип. Ю.И. Эрлих, 1903. 495 с.
6. *Первый университет в Сибири.* Томск : Типография «Сибирского вестника», 1889. 93 с.
7. *Романович М.Е.* Гражданская архитектура: части зданий. В 4 томах. Санкт-Петербург : Скоропечатня И.О. Яблонского, 1903. – 4 т.
8. *Залесский В.Г.* Архитектура. Краткий курс построения частей зданий. Москва : Тип. Т-ва И.Н. Кушнерова, 1904. 569 с.
9. *Де-Рошенфор Н.И.* Урочные положения. Петроград ; Москва : Тип. Петроградской одиночной тюрьмы, 1916. 716 с.
10. *Бронни Л., Фишер В.* Краткое руководство к строительному искусству и архитектуре. Вып. 2. Санкт-Петербург : Изд-во Г.В. Гольстена, 1914. 230 с.
11. *Зиборов М.* Строительное искусство. Курс младшего класса Николаевской инженерной академии. Санкт-Петербург : Тип. Императорской академии наук, 1897. 133 с.
12. *Полищук А.А.* Курс строительного искусства. Часть IV. Санкт-Петербург : Скоропечатня П.О. Яблонского, 1903. 303 с.

REFERENCES

1. *Popov M.F.* Brief historical sketch of Tomsk University: for the first 25 years of its existence (1888–1913). Tomsk, 1917. 544 p. (In Russian)
2. *Zalesov V.G.* Tomsk architecture in 19–20th centuries. Tomsk: TSUAB, 2004. 168 p. (In Russian)
3. TSU history. Available: www.tsu.ru/university/tsutoday/istoriya_nazvaniya_tgu.php (accessed March 20, 2024). (In Russian)
4. Guidelines for dismantling of slabs. In: Tomsk, field survey of Tomsk State University. 1987. (In Russian)
5. *Berngard V.R.* Course of civil architecture. Saint-Petersburg: Y.I. Ehrlich, 1903. 495 p. (In Russian)
6. The first university in Siberia. Tomsk: "Sibirsky Vestnik", 1889. 93 p. (In Russian)
7. *Romanovich M.E.* Civil architecture. Parts of buildings. Saint-Petersburg: P.O. Yablonsky's Printing House, 1903. (In Russian)
8. *Zalesskiy V.G.* Architecture. Brief course of building parts construction. Moscow: I.N. Kushnerev's t-typ. Company, 1904. 569 p. (In Russian)
9. *De-Roshenfor N.I.* Lesson provisions. Petrograd, Moscow: Petrograd Solitary Prison Publ., 1916. 716 p. (In Russian)
10. *Bronisch L., Fischer W.* A brief guide to building art and architecture, Issue 2. Saint-Petersburg: G.V. Golsten, 1914. 230 p. (In Russian)
11. *Ziborov M.* Construction art. Junior class course of the Nikolayev Engineering Academy. Saint-Petersburg: Imperial Academy of Sciences, 1897. 133 p. (In Russian)
12. *Polischuk A.A.* Course of Construction Art. Saint-Petersburg: P.O. Yablonsky's Printing House, 1903. 303 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Кутуков Александр Алексеевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, surolk@outlook.com

Романова Лариса Степановна, канд. архитектуры, доцент, советник РААСН, член ТРО СА России, зав. кафедрой, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, lara235@yandex.ru

Колокольцева Евгения Николаевна, ст. преподаватель, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Authors Details

Aleksandr A. Kutukov, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, surolk@outlook.com

Larisa S. Romanova, PhD, A/Professor, RAASN advisor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, lara235@yandex.ru

Evgeniya N. Kolokoltseva, Senior Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.05.2024
Одобрена после рецензирования 21.05.2024
Принята к публикации 22.05.2024

Submitted for publication 10.05.2024
Approved after review 21.05.2024
Accepted for publication 22.05.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 94–103.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 94–103.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.001

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-94-103

EDN: RLNPHD

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕРРИТОРИИ КАК РЕСУРС ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКИХ ГОРОДОВ

Сергей Валерьевич Головин

*Центральный научно-исследовательский и проектный институт
Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

Аннотация. Актуальность работы связана с необходимостью эффективного использования бывших промышленных территорий внутри города. С развитием агломераций таких территорий становится все больше, и появляется потребность в их устойчивом развитии.

В настоящей работе раскрывается проблематика заброшенных территорий в черте города.

Целью исследования является оценка возможности использования бывших промышленных территорий для устойчивого развития городов.

В результате исследования приведены методы работы с заброшенными территориями. Применение данных методов способно уменьшить количество пустот и деградирующих территорий внутри города, улучшив тем самым социальные, экономические, транспортные и экологические факторы. Таким образом, повышается территориальная связанность города, уменьшается социальная изоляция.

Ключевые слова: внутригородские промышленные зоны, устойчивая архитектура, устойчивое городское развитие

Для цитирования: Головин С.В. Промышленные территории как ресурс для устойчивого развития российских городов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 94–103. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-94-103. EDN: RLNPHD

ORIGINAL ARTICLE

FORMER INDUSTRIAL AREAS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF RUSSIAN CITIES

Sergey V. Golovin

*The Central Research and Design Institute
of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services
of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract. The relevance of the work is determined by the need for effective use of former industrial areas within the city. A rapid urban development provides more and more such sites,

and there is a need for their sustainable development. This work discusses the problem of abandoned territories within the city.

Purpose: The aim of the work is to assess the possibility of using former industrial areas for sustainable urban development.

Research findings: Methods for working with abandoned areas can reduce the number of undeveloped and degraded areas. This improves social, economic, transport and environmental factors. The city communication becomes better, while its social and territorial isolation decreases.

Keywords: intracity industrial zones, sustainable architecture, urban development

For citation: Golovin S.V. Former industrial areas for sustainable development of Russian cities. Vestnik Tomского государственного архитектурно-строительного университета – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 94–103. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-94-103. EDN: RLNPHD

Введение

Со стремительным развитием агломераций растет актуальность эффективного использования бывших промышленных территорий внутри города. Подобные территории часто являются зонами отчуждения. Появление таких зон отчуждения создает неблагоприятную среду и препятствует развитию города, а также негативно влияет и на соседние населенные пункты.

В настоящем исследовании рассмотрена проблематика влияния бесхозных территорий на город. Цель статьи – показать возможности использования наследства в виде бывших промышленных территорий для устойчивого развития городов.

Задачами работы стали: анализ причин возникновения заброшенных территорий внутри города; классификация и описание подходов для работы с ними.

Место бывших промышленных территорий в формировании городской среды

В XIX в. благодаря промышленной революции средневековые по структуре европейские города радикально преобразуются. Города становятся промышленными центрами и привлекают все большее количество людей.

Середина XX в. отмечена стремительной индустриализацией, и большинство промышленных центров формируются именно в это время. Постепенно промышленность становится одним из важнейших факторов развития городов.

В конце XX в. начинается переход к постиндустриальному обществу. Места хранения и транспортировки, такие как фабрики, заводы, склады, старые гавани и железнодорожные станции, железнодорожные пути в черте города, теряют свою актуальность. Такие объекты могут иметь масштаб от одного здания до целого города. Консервация этих объектов происходила по разным причинам: слабость экономики, изменения в городском планировании, нерешительность бизнеса и т. д.

Параллельно с процессом деиндустриализации продолжается урбанизация. Рынок услуг вытесняет производство из города. Ценность земли в черте города продолжает расти, все актуальнее становится вопрос о рациональном использовании территорий.

Влияние развития промышленности на городскую среду. Изначально города формировались на пересечениях торговых путей, с непосредственным

доступом к пресной воде и с возможностью развития сельского хозяйства. Дороги, реки и прибрежные морские пути были важным фактором выбора места для поселений и их потенциального роста и развития. Города имели очень плотную нерегулярную структуру со смешанными функциями в пределах пешеходной доступности.

После промышленной революции XVIII в. каналы и железные дороги были наложены на существовавшую транспортную сеть. Происходила трансформация города с формированием более регулярной структуры.

С конца 1960-х гг. появился новый слой – сеть автомагистралей и высокоскоростных железных дорог, обслуживающих, в свою очередь, промышленность города. Промышленные центры привлекают рабочую силу и таким образом создают совершенно новую городскую застройку. В непосредственной близости от производства возникают спальные районы, они характеризуются регулярностью, типизацией и функциональным обособлением от исторического центра города.

С переходом к постиндустриальному обществу исторические центры начинают снова играть ведущую роль в развитии городов. Растут требования к качеству жизни. Экстенсивное развитие города сменяется на интенсивное. Все большую актуальность начинает приобретать земля, на которой ранее располагались пришедшие в упадок предприятия и элементы инфраструктуры.

Связь внутригородских промзон и прилегающих территорий. Процесс деиндустриализации и переселения людей из регионов в крупные города при переходе в постиндустриальную эпоху привел к постепенной деградации бывших промышленных территорий.

На сегодняшний день города растут за счет развития селитебной зоны. Требования для размещения промышленности в городе вблизи селитебной застройки содержат строгие ограничения. Таким образом могут размещаться только предприятия V класса, не выделяющие вредных веществ, без пожароопасных процессов, без превышения шумового порога в процессе производства и не требующие организации железнодорожных подъездов. Таким образом, крупные промышленные комплексы переносятся за черту города.

Потребности населения города меняются, а бывшие промышленные территории остаются заброшенными. Более того, часто перенесенные производства постепенно оказываются в черте города и при изменении технологических процессов, в связи с экономической нецелесообразностью переноски под новое производство, также становятся заброшенными.

Упадок промышленных территорий. Из-за ухода промышленных предприятий в пределах города растет количество бесхозных территорий. Со временем данные территории деградируют и начинают негативно влиять на окружающие районы. Люди, живущие рядом, ранее зависевшие от работающих там предприятий экономически, теряют в доходе и уровне жизни, переезжают ближе к действующим предприятиям или меняют род деятельности. Социальный фактор района становится иным, а заброшенные территории остаются и продолжают неблагоприятно влиять на окружение. Физическая обособленность рождает обособленность социальную. Такие территории в черте города остаются бесхозными и негативно воздействуют на развитие городской среды, часто они становятся пустырями и оказываются вне города.

Промышленные территории в постиндустриальном городе. Постиндустриальные города продолжают увеличивать население. Со временем растет и требование к качеству жизни. Можно выделить два основных тренда: повышение качества жилой среды и качества общественных пространств и центров. Также нужно отметить повышение ценности исторической застройки и самобытности места.

Многие российские города обладают большим промышленным советским наследием, создающим существенный дисбаланс в развитии территорий, которое происходит спонтанно и во многом неосознанно. Появляется необходимость в четких принципах устойчивого развития, некоторые из которых относятся непосредственно к качеству городской среды, остальные – косвенно через экономические, социальные и экологические факторы.

Приходящие в упадок бывшие промзоны обладают потенциалом, полностью соответствующим существующим принципам устойчивого развития городов. Такие территории и объекты при правильном подходе могут стать точками притяжения и способствовать развитию города. Так, меняя функцию бывших промышленных объектов, выполняя комплексную работу с территориями, благоустраивая их, повышая транспортную связанность и открытость, можно значительно улучшить социальную и экологическую составляющие города, при этом сохранив его идентичность.

Требования к среде обитания в постиндустриальных городах. Индустриальная эпоха России оставила после себя множество объектов различного назначения, многие из которых постепенно утратили свою ценность и были заброшены.

Заброшенные территории можно найти по всей стране – в крупных и провинциальных городах, в отдаленных селах. По статистике ДОМ.рф: «В центральных районах 70 % российских городов находятся неиспользуемые промышленные территории и объекты культурного наследия, заброшенные здания».

Интерес к таким территориям застройщиков обусловлен в первую очередь их местоположением и возможностью организации строительства и реализации жилья.

Стоит отметить, что переуплотнение таких участков в городах ведет к негативным эффектам, в числе которых перегрузка ближайшей инфраструктуры, проблемы с транспортом и экологией. Таким образом, важно учитывать принципы устойчивого развития города. Тенденция к устойчивому развитию намечает прекращение территориальной экспансии городов. Она включает в себя инновационные инженерные решения и новые виды строительных материалов для обеспечения более безопасной, здоровой и энергоэффективной среды обитания.

Другой значимый фактор – многофункциональность и гибкость в использовании пространств. При этом устойчивое развитие подразумевает сохранение исторической среды и культурного наследия.

Проект реорганизации Новой Голландии в Санкт-Петербурге является одним из наиболее известных примеров успешной трансформации бывшей промышленной территории в уникальный городской квартал. Новая Голландия – это исторический остров, расположенный в центре города, ранее слу-

живший арсеналом и верфью. Главной идеей проекта было превращение Новой Голландии в место встречи и взаимодействия жителей и гостей города. Основные этапы реконструкции включали восстановление и сохранение исторических зданий и сооружений, а также создание новых объектов инфраструктуры. Особое внимание было уделено реставрации зданий кузнечных мастерских, Комендантского дома и бывшей морской тюрьмы, получившей впоследствии неформальное название «Бутылка». Здания на острове были отреставрированы с учетом их историко-архитектурных достоинств, с сохранением оригинальных деталей.

На острове были построены современные жилые комплексы, офисы и пространства для творческих индустрий. «Проект включает помещение театра, залы для проведения конференций, галереи, гостиницу, магазины, квартиры и рестораны с подвижной ареной в самом центре» [1]. Проект Новой Голландии стал символом слияния исторического наследия и современного дизайна, создавая привлекательное пространство для жизни, работы и отдыха. Остров стал местом проведения множества культурных событий, фестивалей, выставок и концертов, привлекая как местных жителей, так и туристов.

В Москве, в свою очередь, «Программа развития производственных территорий» ускорила процесс перехода и реорганизацию бывших промзон, упростив процедуру освоения высвобождаемых земель города девелоперами. Однако периодически возникают проблемы в реконструкции, т. к. Москва обладает большим количеством объектов культурного наследия (ОКН) непосредственно на промышленных территориях.

В реконструированном промышленном районе, где в конце 1800-х гг. располагался Московский газовый завод, почти столетие обеспечивавший газом топливом Москву, в настоящее время находится завод «Арма». Сегодня это один из самых ярких творческих районов города. Бизнес-квартал «Арма» является одним из растущего числа примеров бывших промышленных зон, преобразованных в многофункциональные районы, где старые здания уступили место галереям и художественным центрам, местам проведения мероприятий и выставок, офисам, кафе, архитектурным и дизайнерским фирмам.

Комплекс состоит из четырех газгольдеров и девяти реконструированных корпусов. Нижние этажи выполняют торговую функцию, наверху располагаются арендные помещения. Важно отметить, что при реконструкции были сохранены только исторически ценные фасады. Фундаменты были укреплены, а на кровлях появились мансардные этажи. В целом архитектурный ансамбль был сохранен, реновация наполнила объект новыми функциями.

Стоит также отметить проект реконструкции завода «Октава» в Туле, целью которого стало сохранение и восстановление уникального промышленного наследия Тулы и создание нового современного городского пространства. Главной идеей проекта было объединение исторических зданий завода с новыми объектами инфраструктуры, создание просторных зон отдыха и культурных площадок для горожан.

В рамках проекта на территории «Октавы» были реконструированы и восстановлены исторические здания с сохранением архитектурного облика и уникальных деталей. Заводские сооружения были преобразованы в мно-

гофункциональные пространства, такие как музеи, выставочные залы, творческие мастерские и места для проведения культурных мероприятий.

Кроме того, на территории «Октавы» появились новые объекты инфраструктуры: рестораны, кафе, магазины, апартаменты, офисы и паркинги. Создание комфортной городской среды и благоустроенных пешеходных зон стало одним из приоритетов проекта.

Принципы устойчивого архитектурного и градостроительного развития. Важность принципов устойчивого развития городов была подчеркнута на Европейской конференции по устойчивому развитию больших и малых городов в Страсбурге в 2008 г., где была принята Европейская хартия городов II.

В Манифесте новой урбанистики подчеркивается: «Города, к которым мы стремимся, это города, основанные на устойчивом развитии, учитывающие важность защиты местной и глобальной окружающей среды» [4].

Устойчивое городское развитие – это использование городом ресурсов и пространства, обеспечивающее минимальный ущерб окружающей среде. Устойчивое городское развитие включает в себя следующие основные принципы:

1. Эффективное использование ресурсов, таких как земля, энергия, вода и материалы. Архитектурные и градостроительные решения должны стремиться к минимизации потребления ресурсов и максимизации их эффективного использования. Например, здания могут быть спроектированы с применением энергосберегающих технологий, таких как солнечные панели, изоляция и эффективная система отопления и охлаждения.

2. Охрана окружающей среды. Устойчивая архитектура и градостроительство должны учитывать воздействие на окружающую среду. Может включать выбор экологически чистых материалов, минимизацию выбросов вредных веществ и улучшение качества воздуха и воды. При проектировании городов также учитывается сохранение природных ландшафтов, биоразнообразие и создание зеленых пространств.

3. Доступность для всех категорий граждан. Устойчивое развитие городской среды стремится обеспечить социальную справедливость и равенство возможностей для всех жителей. Это означает создание доступного жилья, общественных пространств и инфраструктуры, а также учет потребностей различных социальных групп. Например, градостроительные проекты могут включать жилые зоны различного уровня доходов, доступные общественные пространства и общественный транспорт, удобные для всех людей, включая маломобильные группы населения (МГН).

4. Устойчивая транспортная система. Транспорт имеет значительное влияние на устойчивость городов. Устойчивое архитектурное и градостроительное развитие предполагает создание компактных городов, способствующих уменьшению необходимости в автомобильных поездках. Этому также помогает развитие общественного транспорта, пешеходной и велосипедной инфраструктуры.

5. Вовлеченность местного населения. Важным аспектом устойчивого развития является активное участие локального сообщества в процессе принятия решений относительно архитектурных и градостроительных проектов.

Диалог с жителями, учет их мнений и потребностей помогают создавать среду, которая отражает ценности и интересы местного населения.

6. Создание эстетически полноценной и функционально разнообразной среды. Сохранение исторической среды и самобытности.

Эти принципы устойчивого архитектурного и градостроительного развития взаимосвязаны и должны быть учтены на всех этапах проектирования и строительства, чтобы создать устойчивые, энергетически эффективные и жизнеспособные города для настоящего и будущих поколений.

Потенциал промышленных территорий внутри города

Потенциальные аспекты внутригородских промышленных зон, отвечающие принципам устойчивого архитектурно-градостроительного развития. Промышленные участки, здания и комплексы в черте города – наследие, которым обладает каждый индустриальный город. Такие территории имеют значительный потенциал для различных аспектов развития.

1. Исторический аспект. Бывшие производственные здания часто являются главным элементом, вокруг которого развивались прилегающие территории. Они отражают историю места и сохраняют его самобытность, что придает территории еще большую ценность.

2. Архитектурный аспект. Большие производственные объекты и вспомогательные обслуживающие здания создавались как единый архитектурный ансамбль. Даже при своем нередко колоссальном размере они остаются соразмерны человеку. Архитектурное разнообразие форм и деталей делает такую среду благоприятной для пребывания. Более того, здания фабрик, мануфактур и заводов являются «пионерами» утилитарной эстетики. Пролеты в них максимальны для своего времени постройки, они по возможности очищены от лишних конструктивных элементов. Планировочные схемы универсальны и позволяют адаптировать их к новым функциям с минимальными затратами.

3. Конструктивный аспект. Большой запас прочности, заложенный в промышленных зданиях, дает свободу в реконструкции таких объектов. Каркасы и рамы позволяют добавлять дополнительные конструктивные элементы.

4. Территориальный аспект. Промышленные зоны в черте города находятся в ключевых, легкодоступных участках. Эти районы пользуются популярностью и, как следствие, уплотняются. При реорганизации промышленных зон можно добиться улучшения качества жизни в окружающих районах. Более того, территория города используется более рационально, уменьшается дисбаланс в развитии городских территорий.

5. Социальный аспект. С улучшением качества среды район начинает интересовать экономически более независимую часть населения города. Постепенно, предлагая удобную инфраструктуру, комфорт и качество среды, район из маргинального превращается в более успешный и начинает приносить пользу городу.

Основные признаки бесхозных промышленных территорий. Охарактеризовать заброшенные территории и объекты можно по нескольким основным признакам:

1. Время постройки. Определяет историческую ценность объекта.

2. Масштаб. Объекты могут иметь масштаб от одного здания до целого города. Подход и потенциал в разных случаях будет сильно отличаться.

3. Функция и тип бесхозного объекта.

4. Причина упадка. Экономические, социальные или экологические факторы, которые привели к заброшенности объекта, являются важным индикатором его потенциала. Возможность их нивелирования или преодоления является важным фактором в работе с подобными объектами.

5. Степень сохранности территории и объектов может также многое дать в понимании потенциала. Так, при полностью разрушенном объекте акцентируются характеристики местоположения. И наоборот, в случае определения ценности объекта культурного наследия на первый план выходит его восстановление.

Методы раскрытия потенциала бывших промышленных территорий. Возможность раскрытия потенциала промышленной территории в первую очередь опирается на признаки объекта (территории), с которым начинается работа. После анализа признаков объекта (территории) и учета основных аспектов, отвечающих устойчивому развитию, происходит выбор метода работы с объектом.

Существует множество методов работы с бесхозными промышленными объектами. В целом их можно разделить на 4 основные подгруппы:

– *реновация* – изменение и внешнего облика, и внутренней структуры, и функции объекта;

– *реконструкция* включает в себя перестройку и реставрацию. Используется в основном в отношении объектов культурного наследия;

– *снос и новое строительство* – наиболее экономически целесообразный метод, но с наименьшим потенциалом к созданию устойчивой среды;

– *ревитализация* – изменение функции объекта или территории при сохранении внешнего облика и структуры.

Важно дополнительно отметить методы реконструкции бывших промышленных объектов [3].

Первый – метод аппликации, базирующийся на создании новой композиции фасада, основанной на уже сложившейся конструктивной системе.

Второй – метод аналогий, предполагающий сравнение с подобными объектами и проведение аналогии между функциональным назначением объекта и архитектурными образами и деталями.

Третий – метод интеграции, т. е. врезка дополнительных элементов и структур в существующие конструкции здания. Прием: создание новых доминант или усиление старых, пристройка объемов, коммуникационных пространств, смена масштабов здания (адаптивность к окружающим масштабам застройки).

Также стоит назвать три различных подхода к преобразованию промышленных территорий с функциональной точки зрения:

– сохранение промышленной функции;

– частичная рефункционализация;

– полная рефункционализация [2].

При правильном выборе методики можно добиться высоких результатов в раскрытии потенциала бесхозных промышленных территорий.

Заключение

В исследовании показано влияние промышленных территорий на развитие городов и формирование городской среды. Выявлена связь промышленных территорий с окружающими районами. Показан механизм упадка промышленных объектов и появления в результате бесхозных территорий.

Описано отношение к промышленным территориям в постиндустриальном городе. Приведены новые требования к городской среде и примеры успешных отечественных реализованных проектов. Дополнительно рассмотрены принципы устойчивого развития городов.

Показаны аспекты промышленных зон, отвечающие принципам устойчивого развития, указаны основные признаки бесхозных промышленных территорий, приведены методы работы по их реконструкции.

Таким образом, подчеркивается важность освоения бывших промышленных территорий. На основе анализа и правильного выбора методики можно уменьшить количество пустот и деградирующих территорий внутри города, повысить качество среды окружающих районов, улучшить социальную и экологическую составляющие города, обеспечить его устойчивое развитие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев М. Реновация промышленных территорий и объектов // Архитектурная графика. URL: http://arch-grafika.ru/publ/bez_kategorij/bez_kategorij/renovacija_promyshlennykh_territorij_i_obektov/12-1-0-69/ (дата обращения: 22.06.2023).
2. Грахов В.П., Мохначев С.А., Манохин П.Е., Виноградов Д.С. Основные тенденции современных проектов реновации промышленных зон // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 400–404. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41105> (дата обращения: 19.06.2023).
3. Дрожжин Р.А. Реновация промышленных территорий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 1 (11). С. 84–86.
4. Европейская хартия городов II Манифест новой урбанистики // 15-я пленарная сессия, Страсбург, 27–29 мая 2008 г. URL: <https://rm.coe.int/-/ii-/168071a868> (дата обращения: 15.06.2023).

REFERENCES

1. Andreev M. Renovation of industrial territories and objects. Architectural graphics. Available: http://arch-grafika.ru/publ/bez_kategorij/bez_kategorij/renovacija_promyshlennykh_territorij_i_obektov/12-1-0-69/ (accessed June, 22, 2023). (In Russian)
2. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Manokhin P.E., Vinogradov D.S. Main trends of modern projects for renovation of industrial zones. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016; (12-2): 400–404. Available: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41105> (accessed June 19, 2023). (In Russian)
3. Drozhzhin R.A. Renovation of industrial territories. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2015; 1 (11): 84–86. (In Russian)
4. European Urban Charter II Manifesto for a New Urbanism. In: *Proc. 15th Plenary Session, Strasbourg, 27–29 May 2008*. Available: <https://rm.coe.int/-/ii-/168071a868> (accessed June 15, 2023).

Сведения об авторе

Головин Сергей Валерьевич, аспирант, Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, svgolovin@hotmail.com

Author Details

Sergei V. Golovin, Research Assistant, The Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 29, Vernadskii Ave., 119331, Moscow, Russia, svgolovin@hotmail.com

Статья поступила в редакцию 25.01.2024
Одобрена после рецензирования 19.03.2024
Принята к публикации 22.04.2024

Submitted for publication 25.01.2024
Approved after review 19.03.2024
Accepted for publication 22.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 104–117.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 104–117.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 378.09

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-104-117

EDN: PMZZUN

СТАНОВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ГОРОДЕ ТОМСКЕ В ПЕРВОЙ ТРЕТИ XX В.

Владислав Михайлович Песков

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. История инженерно-строительного образования в г. Томске насчитывает более века. В статье представлена общая картина предпосылок становления технического и инженерно-строительного образования в азиатской части Российской империи в конце XIX – начале XX в., показаны особенности первых лет существования новой архитектурной школы за Уралом, пути развития образовательного процесса.

Актуальность. В конце XIX в. с открытием первого университета за Уралом Томск приобрел особую значимость как город науки. В историографии известны работы, посвященные высшему образованию в г. Томске. Однако комплексные научные работы в отечественной историографии, посвященные становлению инженерно-строительного образования в азиатской части России, и в частности в Томске, мало представлены.

Значимый вклад в развитие инженерно-строительного образования Томска внесли К.К. Лыгин, А.Д. Крячков, И.И. Бобарыков, А.Э. Сабек, Ф.Ф. Гут, П.Ф. Федоровский, однако их участие в значимом историческом процессе не освещено в полной мере.

Целью настоящей работы является комплексное исследование вклада первых руководителей Технологического института и преподавателей инженерно-строительного отделения в формирование учебного процесса инженерно-строительного профиля.

Работа рассматривает хронологическую последовательность этапов становления инженерно-строительного и архитектурного образования, начиная с открытия Томского технологического института, заканчивая выделением направления (факультета) в отдельное высшее учебное заведение и переездом его в г. Новосибирск. Временные границы исследования – первая треть XX в., но для уточнения значимых фактов, для полноты картины в отдельных случаях они могут быть расширены.

Результаты. Приведенные новые сведения дополняют существующие исторические исследования, расширяют информацию о становлении инженерно-строительного образования и проблемах, с которыми сталкивались первые руководители высшей инженерно-строительной школы в г. Томске.

Ключевые слова: Россия, Томск, Технологический институт, архитектурное и строительное образование

Для цитирования: Песков В.М. Становление инженерно-строительного образования в городе Томске в первой трети XX в. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 104–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-104-117. EDN: PMZZUN

ORIGINAL ARTICLE

FORMATION OF CIVIL ENGINEERING EDUCATION IN TOMSK

Vladislav M. Peskov

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. The history of civil engineering education in Tomsk dates back more than a century. The article presents the prerequisites for the creation of technical and civil engineering education in the Asian part of the Russian Empire in the 19–20th centuries. The first years of existence of a new architectural school beyond the Urals are describe as well as the formation of the educational process. Some aspects are reflected in works of Siberian scientists and urban planners.

Despite the importance of Tomsk as a science city since the end of the 19th century, scientific works on the formation of civil engineering education in the Asian part of Russia and in Tomsk are absent. A historical contribution to the development of civil engineering education by such people as K.K. Lygin, A.D. Kryachkov, I.I. Bobarykov, A.E. Sabek, F.F. Gut, P.F. Fedorovsky, is not fully consecrated in the context of their teaching activities.

This work is a comprehensive study of contributions of each historical person to the educational process of civil engineering.

The work has a strict chronological sequence, considers formation stages of of civil engineering and architectural education, starting with the opening of the Tomsk Technological Institute, ending with the separation of faculties into a higher educational institution and its relocation to Novosibirsk. Historical events in question took place at the end of the 19th and late in 20th centuries.

New information given in the article complements existing historical research, expands available information about problems faced by the first leaders of higher engineering and construction school in Tomsk.

Keywords: Russia, Tomsk, Technological institute, architectural and construction education

For citation: Peskov V.M. Formation of civil engineering education in Tomsk. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 104–117. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-104-117. EDN: PMZZUN

История становления инженерно-строительного образования

До конца XIX в. в России существовали два столичных центра, в которых можно было получить инженерно-строительное и архитектурное образование. В Санкт-Петербурге действовала Императорская Академия художеств (1757 г.), Институт (училище) гражданских инженеров (1832 г.), художественное училище (1839 г.), также имел большое значение Институт Корпуса инженеров путей сообщения, открытый в 1809 г. Жизнь одного из выпускников данного учреждения – Гавриила Степановича Батенькова (1763–1863) – долгое время была связана с Томском. С апреля 1817 г. Г.С. Батеньков занимался благоустройством Томска: мостил улицы и следил за правильным сооружением водоотводов, сконструировал и построил Магистерский мост, благоустроил водоносный ключ у подножия Воскресенской горы и многое другое [1]. В Москве архитектурное образование оформлялось на базе школ крупных московских архитекторов (В.И. Баженова, М.Ф. Казакова, Д.В. Ухтомского), к началу XIX в. они стояли у порога основания Кремлевского архитектурного училища [2].

Инженерно-строительное образование в Томске неразрывно связано с открытием Томского технологического института Императора Николая II.

В конце XIX в. Сибирь формировалась как важнейший для государства экономический район. Соответственно, для развития значимого края требовались разнопрофильные специалисты. Стимулом к решению назревшего вопроса послужило окончание строительства Великого Сибирского железнодорожного пути [3]. Привлечение специалистов для обслуживания нужд железной дороги из европейской части России очень дорого обходилось казне. К тому же после истечения трехлетнего договора большинство приехавших лиц уезжали обратно. В связи с этими обстоятельствами остро встал вопрос о подготовке инженеров на месте [4].

В начале 1895 г. министр финансов С.Ю. Витте впервые высказал предложение о подготовке специалистов в Сибири. Министру народного просвещения И.Д. Делянову следовало решить вопрос о подготовке необходимого количества инженеров по наиболее востребованным специальностям. Позднее И.Д. Делянов писал в своем представлении в Государственный совет: «По мнению тайного советника С.Ю. Витте, вполне мною разделяемому, не подлежит сомнению, что для успешного достижения этих целей предстоит необходимость в подготовке сведущих лиц, которые <...> могли бы руководить обработкою находящихся в недрах Сибири естественных богатств и применением их к потребностям жизни» [5].

В этом же году, после письма В.М. Флоринскому от И.Д. Делянова о возможности открытия при Императорском Томском университете физико-математического факультета [5], в Томске и Петербурге начались обсуждения. В Томске по данному вопросу В.М. Флоринский в августе 1895 г. созвал совещание. Среди принявших участие были ректор Томского университета А.И. Судаков, профессора Е.В. Вернер, Н.Ф. Кащенко, А.М. Зайцев. В результате обсуждения его участники пришли к единогласному заключению о возможности организации подготовки инженеров на особом техническом отделении, созданном при физико-математическом факультете. Были выработаны проекты физико-математического факультета и технического отделения при нём и рассчитана примерная стоимость.

В то же время в Петербурге была создана комиссия под председательством профессора Московского университета И.А. Любимова для обсуждения проекта нового факультета в Томском университете. В состав комиссии вошли директора технологических институтов и ряд ведущих профессоров петербургских и московских институтов. Комиссией был рассмотрен учебный план, составленный представителями Томского университета, в который входили и предложения по строительству новых корпусов. По совету С.Ю. Витте И.Д. Делянов обратился к выдающемуся русскому ученому Д.И. Менделееву с просьбой войти в состав комиссии по учреждению института в Сибири. Он хорошо знал, какой должна быть высшая техническая школа, и принял деятельное участие в работе комиссии, сделав ряд ценных предложений по улучшению качества высшего образования [6].

Созданная при Министерстве народного просвещения комиссия по утверждению высшей технической школы в Сибири после девяти заседаний

пришла к заключению о необходимости открытия в Томске самостоятельного Технологического института для подготовки инженеров с двумя отделениями: инженерно-строительным и химико-техническим. На последнем предполагалось усиленное преподавание электротехники и металлургии ввиду быстрого развития горного дела в Сибири. В итоге 14 марта 1896 г. Государственный совет рассмотрел представление И.Д. Делянова об учреждении в Томске Технологического института и принял решение о его открытии с двумя отделениями – механическим и химико-техническим. 29 апреля 1896 г. решение Государственного совета было утверждено императором Николаем II. Таким образом, на рубеже веков по императорскому указу в Томске был учрежден Томский технологический институт [6].

Через 6 лет в стенах ТТИ было открыто инженерно-строительное отделение. Начиная с начала XX в. благодаря стараниям А.Д. Крячкова начинает формироваться региональная инженерно-строительная школа, а с 1909 г. – школа архитекторов, первая в азиатской части Российской империи.

Необходимо отметить, что подготовка инженеров-строителей в Сибири стала возможна благодаря стараниям первого директора, профессора Ефима Лукьяновича Зубашева (рис. 1). В июле 1900 г., рассмотрев вопрос о расширении ТТИ, Государственный совет принял постановление дополнительно открыть горное и инженерно-строительное отделения [7]. Согласно отчету ТТИ за 1902 г., 1 сентября 1902 г. на базе института начался учебный процесс по инженерно-строительной специальности. Первым деканом отделения был назначен Иван Иванович Бобарыков (рис. 2), который уже являлся деканом механического отделения.



Рис. 1. Ефим Лукьянович Зубашев¹
Fig. 1. Yefim Luk'yanovich Zubashev



Рис. 2. Иван Иванович Бобарыков²
Fig. 2. Ivan Ivanovich Bobarykov

Занятия велись в лекционном корпусе ТТИ на третьем этаже, основные площади которого занимали чертежные залы. В дальнейшем для отделения был построен инженерный корпус, который разместился рядом с лекционным корпусом.

¹ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Зубашев_Ефим_Лукьянович#

² URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Бобарыков_Иван_Иванович#

И.И. Бобарыков (1844–1928) – ординарный профессор по кафедре прикладной механики и машиностроения, инженер-технолог, коллежский советник, выпускник механического отделения Харьковского технологического института с присвоением звания инженера-технолога (1894 г.). По окончании института – вольнонаемный лаборант при механическом отделении, руководитель технического черчения. С целью ознакомления с достижениями науки и техники активно посещал различные выставки и промышленные предприятия. В 1895 г. был направлен в командировку для изучения крупных устройств и способов изготовления приборов по отоплению и вентиляции в Петербург, Москву, Одессу. В 1896 г. посетил Всероссийскую промышленную и художественную выставку в Нижнем Новгороде. В сентябре 1899 г. был командирован на машиностроительные предприятия Германии, Франции, затем на промышленные предприятия России. Летом 1900 г. посетил Всемирную выставку в Париже. С 1901 г. вел научную и преподавательскую деятельность в Томске. В июне 1916 г. Советом института был избран директором Томского технологического института (с 21 сентября 1917 г. – ректором). Благодаря действиям Ивана Ивановича удалось сохранить институт в условиях Первой мировой и Гражданской войн [8].

На Совете института в апреле 1918 г. И.И. Бобарыков стал инициатором участия профессорско-преподавательского состава в конкурсе по разработке Урало-Кузнецкого проекта, положенного позднее в основу плана ГОЭЛРО и первого пятилетнего плана. Конкурс был выигран, и в разработке проекта участвовали профессор Н.В. Гутовский, сам Бобарыков, Н.П. Чижевский, М.А. Усов, В.Н. Пинегин, преподаватели М.А. Великанов, М.Н. Кошурников и др.

Александр Эдуардович Сабек (1864–1909) (рис. 3) в 1890 г. с отличием окончил Харьковский технологический институт с присвоением звания инженера-технолога. После выпуска начал трудовую деятельность на частном свеклосахарном заводе в Харьковской губернии в должности химика.



Рис. 3. Александр (Дионисий) Эдуардович Сабек³

Fig. 3. Aleksandr (Dionisii) Eduardovich Sabek

Приказом попечителя Западно-Сибирского учебного округа А.Э. Сабек был назначен штатным преподавателем черчения и начертательной геометрии ТТИ с 1 июня 1901 г., а с января 1902 г. по представлению Совета ТТИ – исполняющим должность экстраординарного профессора по кафедре химической технологии минеральных веществ [9]. В 1905 г. занял пост декана инженерно-строительного отделения [8].

Помимо преподавательской деятельности активно участвовал в создании и развитии института, был ближайшим помощником директора, профессора Ефима Лукьяновича Зубашева. В различные периоды занимал руководящие должности: был членом комиссии по изданию лекций и учебных пособий, членом испытательной комиссии по вы-

³ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Сабек_Александр_Эдуардович#

пуску первых инженеров на механическом отделении, председателем такой же комиссии на инженерно-строительном отделении, а с февраля по сентябрь 1906 г. назначен исполняющим должность директора института [10].

В 1909 г. по состоянию здоровья подал прошение об отставке и в этом же году умер в Варшаве.

Под руководством первых деканов отделения И.И. Бобарыкова и А.Э. Саббека началась разработка программы подготовки инженеров-строителей. Перед ними стояла важная задача – вооружить студентов необходимыми для своего времени знаниями и умениями. Поэтому программа подготовки инженеров-строителей составлялась с учётом перспектив экономического развития региона и реальных потребностей Сибирского края в выпуске специалистов определенных профилей [11].

В первые годы существования отделения руководителями были выбраны программы столичных учебных заведений, а также Варшавского, Киевского, Рижского политехнических институтов. Из программ было взято всё самое актуальное, что могло иметь практическое значение для развития науки, организации учебного процесса на инженерно-строительном отделении ТТИ и экономического развития Сибири и Дальнего Востока. С начала 1906 г. А.Э. Сабек и А.Д. Крячков совместно ставили вопрос об организации обучения на инженерно-строительном отделении архитектурной специальности. Основным аргументом было отсутствие данного направления на отделении, соответственно, и инженеров-строителей с архитектурным уклоном, необходимых для градостроительства и возведения гражданских и промышленных зданий вдоль Великого Сибирского пути.

Со временем на инженерно-строительном отделении были открыты новые направления: мосты и сооружения, сухопутные сообщения, водные пути, коммунальное хозяйство, архитектура. Все студенты, освоившие программу и успешно защитившие выпускную квалификационную работу, получали диплом по специальности «инженер-строитель».

В первый год существования инженерно-строительного отделения, в августе 1902 г., были объявлены и прошли вступительные испытания. На 50 вакантных мест было принято 57 прошений. Согласно параграфу 25 положения о ТТИ, уроженцы Азиатской России или же окончившие курс средних учебных заведений Азиатской России, зачислялись без конкурсных испытаний. В таком порядке было зачислено 4 человека. Всего же к конкурсным испытаниям приступили 313 человек, желающих поступить на различные отделения Томского технологического института. По итогам конкурсной кампании в Томский технологический институт было зачислено 228 человек. В дополнение, согласно разрешению министра народного просвещения, в 1902 г. была увеличена норма для лиц иудейского исповедания. Вследствие этого в ТТИ были зачислены еще 8 человек, выдержавших конкурсные испытания, но не прошедших по квоте ранее.

Для зачисления в общем порядке на инженерно-строительный факультет необходимо было показать знания по дисциплинам: русский язык, алгебра, геометрия, тригонометрия, физика.

В результате к началу первого 1902/1903 учебного года на инженерно-строительном отделении приступили к учебному процессу 58 студентов. В 1910 г. там обучалось уже 218 человек [12].

Таким образом, перед руководителями отделения и института встала важная задача найти образованных, компетентных в вопросах строительства и архитектуры преподавателей. К работе на отделении старались привлечь ведущих строителей, архитекторов, художников Томска, которые в своё время получили образование в лучших учебных заведениях страны. Кроме того, ру-



Рис. 4. Константин Константинович Лыгин⁴
Fig. 4. Konstantin Konstantinovich Lygin

ководители ТТИ способствовали дополнительному обучению важных специалистов. Для ознакомления с новыми достижениями в науке и технике многие профессора и преподаватели направлялись в длительные командировки в научные и промышленные центры не только страны, но и за рубеж. Полученные знания и опыт успешно применялись для обучения студентов строительному делу с учётом сибирского климата.

В 1895 г. в Томск приехал Константин Константинович Лыгин (1854–1932) – выпускник Петербургской академии художеств, окончивший ее с отличием (рис. 4). В Европейской России по его проектам строились театры, библиотеки, гимназии и купеческие особняки: в Телави – здание двухклассного училища, в Самаре – дом купца Субботина (рис. 5), в Казани – пассаж Александра (рис. 6).



Рис. 5. Дом купца Субботина (Самара)⁵
Fig. 5. House of the merchant Subbotin (Samara)



Рис. 6. Александровский пассаж (Казань)⁶
Fig. 6. Aleksandrovsky Passage (Kazan)

Почти все здания в существующих и строящихся вместе с Транссибом городах и на станциях возведены по проектам Лыгина. В Тайге в 1897–1899 гг. были построены вокзал, церковь во имя святого Андрея Критского, железнодорожное училище и библиотека имени Пушкина. В молодом прижелезнодорожном посёлке Новониколаевске (ныне Новосибирск) выросли здание вокзала

⁴ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Лыгин_Константин_Константинович#

⁵ URL: <https://chanych-85.livejournal.com/24945.html?ysclid=lu0sxx5f7p933996340>

⁶ URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Александровский_пассаж_\(Казань\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Александровский_пассаж_(Казань))

и храм Св. Александра Невского. В Бийске по проекту зодчего был построен особняк купца Н.И. Асанова, где сейчас находится краеведческий музей. Лучший на всей Средне-Сибирской железной дороге вокзал второго класса в Красноярске, храм Св. Марии Магдалины в Петропавловске (Казахстан) – тоже творения Константина Лыгина. Кроме того, по его проектам построены вокзал, железнодорожное училище, польский костёл и православный храм при кладбище в Мариинске, возведены здания в Кременчуге, Ачинске, Боготоле, Канске, Зиме и других населённых пунктах Сибири. Их архитектура отличалась новизной и смелостью решений [13].

С 1900 г. К.К. Лыгин работал в Технологическом институте, на кафедре архитектуры, преподавал рисование и архитектурное проектирование. Почти на всём протяжении жизни в Томске К.К. Лыгин занимался частной архитектурной практикой. Исторический облик Томска во многом обязан Константину Константиновичу. По его проектам были построены здания для коммерческого училища, окружного суда, общественных нужд Томска (ныне – Дом офицеров), большое количество заказов было выполнено для купеческой семьи Кухтериных.

В 1903 г. К.К. Лыгин был избран членом Томского отделения Императорского Русского технического общества. В 1906 г. по конкурсу был избран штатным преподавателем, вел рисование и архитектурное проектирование, в 1924 г. утвержден в звании профессора Томского технологического института. Во время реорганизации строительного факультета Лыгиным были переработаны многие учебные планы и программы, он состоял членом предметной комиссии, членом государственной квалификационной комиссии, вел дипломное проектирование [14].

Андрей Дмитриевич Крячков (1876–1950) – гражданский инженер (архитектор), выпускник Петербургского института гражданских инженеров (рис. 7). Обучение совмещал с работой чертежника, техника-проектировщика, занимался съемкой планов Петербурга. На старших курсах работал помощником по проектированию у архитекторов А.Д. Харламова и А.И. Дмитриева. После окончания института выбрал возможность приехать в Томск, т. к. в это время в городе открывался новый Технологический институт. С 12 сентября 1903 г. А.Д. Крячков был определен на службу по ведомству Министерства внутренних дел младшим инженером строительного отделения Томского губернаторского управления. Летом 1903 г. был избран штатным преподавателем по архитектурному проектированию и рисованию ТТИ. В 1906 г. стал архитектором Западно-Сибирского учебного округа, одновременно с этим являлся проектировщиком зданий Томского технологического института, сменив на этой должности Ф.Ф. Гута.



Рис. 7. Андрей Дмитриевич Крячков⁷
Fig. 7. Andrey Dmitriyevich Kryachkov

⁷ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Крячков_Андрей_Дмитриевич#

А.Д. Крячков вел большое строительство не только в Томске, но и в других городах губернии, в частности в Новониколаевске, переименованном в 1926 г. в Новосибирск. В Новосибирске по его проектам были построены базарный корпус и более десяти школ, здания Сибдальгосторга и Сибревкома [14].

Адам (Арнольд) Карлович Енш (1866–1920) в 1890 г. окончил Санкт-Петербургский институт гражданских инженеров с присвоением чина инженера X класса (рис. 8). Спустя два года, в 1892 г., подал конкурсный проект по водоснабжению в г. Кременчуге. В 1895–1898 гг. занимал должности главного архитектора г. Житомира и младшего инженера строительного отдела Волынского



Рис. 8. Адам (Арнольд) Карлович Енш⁸
Fig. 8. Adam (Arnol'd) Karlovich Yensh

губернского правления. В 1897 г. создал проект Крестовоздвиженской церкви в г. Житомире, а с января 1898 г. занял пост губернского инженера строительного отделения Ярославского губернского правления [9].

В 1901 г., как стипендиат Совета гражданских инженеров, получил право заграничной командировки, во время которой изучил интересующие его вопросы канализации и сточных вод, а также устройство водопровода в городах Западной Европы. По итогам командировки опубликовал научные работы по изучаемой теме и был направлен в Крым для составления проектов и строительства канализации в Ялте, Алушке, Мисхоре, Гаспи, Кореизе.

В 1903 г. подал прошение в Совет ТТИ об участии в конкурсе по замещению вакансии по кафедре строительного искусства и архитектуры. Конкурсные испытания успешно были пройдены, с 1 июля 1904 г. Адам Карлович был назначен исполняющим должность экстраординарного профессора. В первом семестре читал курс лекций по архитектуре и строительным работам студентам инженерно-строительного отделения, а также общий курс архитектуры студентам механического, горного и химического отделений.

К сожалению, преподавательская деятельность Адама Карловича в стенах ТТИ была непродолжительной. В январе 1905 г. он был направлен на лечение в заграничный 4-месячный отпуск, из которого в Томск не вернулся. В апреле 1905 г. был назначен адъюнкт-профессором по кафедре водоснабжения и канализации Рижского политехнического института, а в январе 1917 г. – экстраординарным профессором [8].

Фортунат Фердинандович Гут (1861–1936) окончил Санкт-Петербургский институт гражданских инженеров в 1884 г. (рис. 9).

По окончании учебного заведения был принят на госслужбу в Техническо-строительный комитет Министерства внутренних дел. В течение последующих 10 лет прошел путь от младшего до губернского архитектора Ставро-

⁸ URL: [https://wiki.tpu.ru/wiki/Енш_Адам_\(Арнольд\)_Карлович#](https://wiki.tpu.ru/wiki/Енш_Адам_(Арнольд)_Карлович#)

польского губернского правления. На доверенных должностях Ф.Ф. Гут соорудил деревянные и железные мосты, шлюзы, плотины, создавал различные пристройки, перестраивал и ремонтировал здания, проектировал новые [15].

По приглашению Комитета по постройке зданий Технологического института в январе 1896 г. Fortunat Ferdinandovich Gut прибыл в Томск, где получил должность строителя зданий института. Началось активное сооружение учебного комплекса. Главный, химический, физический корпуса были возведены по проекту академика Императорской Академии художеств Роберта Робертовича Марфельда.

Вторая очередь – горный корпус – был выполнен по проекту Петра Федоровича Федоровского. Третья очередь – механический и инженерный корпуса – по собственным проектам Ф.Ф. Гута, также Fortunat Ferdinandovich Gut исполнил проекты пристройки к главному корпусу, газового завода и газгольдера, административных и служилых корпусов института. Проекты



Рис. 9. Fortunat Ferdinandovich Gut
Fig. 9. Fortunat Ferdinandovich Gut

и строительство зданий для нужд Технологического института не являлись его единственными работами. Fortunat Ferdinandovich Gut использовал свои знания и умения для выполнения других заказов. Благодаря ему в Томске появились корпуса кирпичеделательного завода с машинным зданием, амбулаторная университетская лечебница, Бактериологический и Учительский институты при Императорском Томском университете.

Имея огромный практический опыт, до 1905 г. Fortunat Ferdinandovich Gut преподавал рисование, архитектуру, архитектурное черчение, читал лекции по строительному искусству, основаниям и фундаментам гражданских сооружений для студентов ТТИ [16].

Пётр Фёдорович Федоровский (1864–1944) – выпускник художественного училища при Академии художеств в Санкт-Петербурге (рис. 10).

В 1895 г. П.Ф. Федоровский получил направление в Томск, где утвердился в должности младшего архитектора строительного отделения губернского правления. Составлял проекты церквей и школ для переселенческих поселков Томской губернии. Спустя год, в 1896 г., стал городским архитектором. В истории Томска осталось немало творений его рук. На рубеже веков активно применял тип открытого фасада. Для того времени это было новшеством: при постройке зданий отказался от использования штукатурки для фасадной отделки, т. к. в связи с климатическими особенностями региона оштукатуренная часть быстро осыпалась, что портило эстетический вид строения. Федоровский стал выполнять фасады из красного кирпича, например, корпус

⁹ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Гут_Фортунат_Фердинандович#

Мариинской женской гимназии, церковно-приходская школа при Никольской церкви и др.

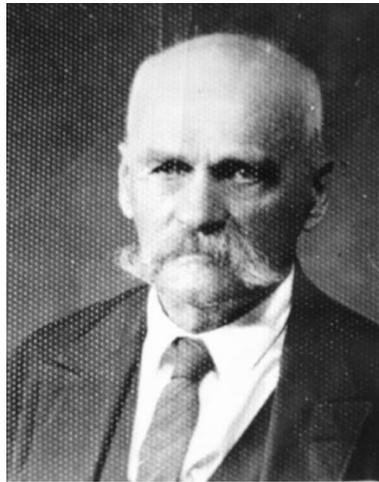


Рис. 10. Петр Федорович Федоровский¹⁰
Fig. 10. Petr Fedorovich Fedorovskiy

с произведениями Григория Ивановича Гуркина и Андрея Осиповича Никулина, знаменитостей и любимцев того времени [17].

Несмотря на возникающие сложности, первым руководителям Томского технологического института и инженерно-строительного отделения удалось основать за Уралом архитектурно-строительную школу. Благодаря правильному подбору кадров получилось заложить крепкий фундамент для обучения инженеров строительного и архитектурного профиля за Уралом. Это позволило спустя 28 лет преобразовать инженерно-строительное отделение в отдельный отраслевой институт [18].

События 1917 г. наложили значительный отпечаток на развитие института. Корпуса использовались для нужд военных, значительно сократилось число студентов. С упразднением в 1925 г. Томской губернии Томск превратился в административный центр Новосибирской области. Первый пятилетний план 1928–1932 гг. предусматривал в кратчайшие сроки провести индустриализацию страны. Появилась необходимость в строительстве сотен промышленных предприятий, для чего требовалось значительное количество высококвалифицированных специалистов.

В результате реорганизации на базе инженерно-строительного факультета было создано новое учебное заведение – Сибирский строительный институт (Сибстрин), который в 1933 г., с окончанием строительства корпусов в г. Новосибирске, был перевезен на новое место. В связи с этим в Томске стало невозможно получить инженерно-строительное образование на протяжении последующих 19 лет.

¹⁰ URL: https://wiki.tpu.ru/wiki/Федоровский_Петр_Федорович#

Заключение

Ввиду социально-экономических изменений на территории Сибири, связанных и с окончанием строительства Великого Сибирского пути, и с началом разведки полезных ископаемых в недрах сибирских земель, в конце XIX в. перед руководством Томской губернии и Российской империи встал вопрос о необходимости принятия решения: открыть самостоятельный Технологический институт или направление технологического профиля в стенах уже существующего Императорского университета.

Вопрос был решен в пользу первого варианта. Однако с открытием Томского технологического института появились другие проблемы, решение которых не могло быть отложено. Необходимо было организовать и утвердить учебный процесс, с чем прекрасно справился коллектив под руководством первого ректора Технологического института Е.Л. Зубашева.

Проблемы наблюдались и с организацией учебного процесса по инженерно-строительному направлению, и с недостатком учебных площадей ввиду продолжающегося строительства корпусов института. Благодаря отверженной работе, полной самоотдаче А.Э. Сабека, А.К. Енша, П.Ф. Федоровского, Ф.Ф. Гута, К.К. Лыгина, которые совмещали преподавательскую деятельность и курирование строительства зданий для нужд ТТИ, поставленные задачи были выполнены. К 1907 г. были завершены основные строительные работы корпусов института и налажен учебный процесс.

Благодаря значительному вкладу А.Д. Крячкова и И.И. Бобарыкова в стенах Технологического института, на инженерно-строительном отделении, появилась возможность получить специальность гражданского инженера. В настоящее время эта специальность известна под другим названием – архитектор.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бойко В.П., Ефименко В.Н., Кадесников А.П., Картопольцев В.М., Музалёв В.М.* Исторические очерки строительства дорог и мостов / под ред. Л.С. Ляховича. 2-е изд. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2012. 149 с.
2. *Залесов В.Г.* Российское архитектурно-строительное образование в XIX – начале XX века // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2010. № 2. С. 24–34.
3. *Отчет о состоянии и деятельности* Томского технологического института Императора Николая II за 1902 год. Томск : Акцидентная типография В.М. Перельмана, 1903. 42 с.
4. *Николаева Н.В.* К вопросу о формировании высшей архитектурно-строительной школы в Сибири (на примере Томска и Новосибирска) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 3. С. 219–240.
5. *ГАТО*. Ф. 126. Оп. 1. Д. 811. Л. 2–3.
6. *Историческая записка* об учреждении и открытии Томского технологического института Императора Николая II 6 декабря 1900 года / по поруч. Совета ин-та сост. А.И. Ефимов. Томск : Паровая типо-литография П.И. Макушина, 1902. 94 с.
7. *Краткая хроника ТПУ: 1985–1991 гг.* / сост. Лозовский И.Т. Томск, ТПУ, 2003. 96 с.
8. *Гагарин А.В.* Профессора Томского политехнического университета : биографический справочник. В 2 томах. Том 1. Томск : Изд-во НТЛ, 2000. 297 с.
9. *Поляки в Томске (XIX–XX вв.)* : биографии / сост. В.А. Ханевич. Томск : Изд-во Томского государственного педагогического университета, 2012. 686 с.

10. *Становление и развитие научных школ* Томского политехнического университета 1896–1996: Исторический очерк / под ред. Ю.П. Похолкова, В.Я. Ушакова. Томск : ТПУ, 1996. 249 с.
11. *Галанова Р.А.* Ефим Лукьянович Зубашев : биографический очерк. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 190 с.
12. *ГАТО.* Ф. 194. Оп. 1. Д. 16. С. 3.
13. *Архитектор всея Сибири* // Красноярский железнодорожник. 2010. 3 сентября. № 34. URL: <https://gudok.ru/zdr/176/?ID=621072&ysclid=>
14. *Гагарин А.В.* Профессора Томского политехнического университета : биографический справочник. В 2 томах. Том. 2. Томск : Изд-во НТЛ, 2000. 216 с.
15. *Барановский Г.В.* Гут Фортунат Фердинандович // Юбилейный сборник сведений о деятельности бывших воспитанников Института гражданских инженеров (Строительного училища). 1842–1892. Санкт-Петербург : Типо-литография Н.Л. Пентковского, 1893. С. 94–95.
16. *Богданова О.В.* Гражданские инженеры – строители Томского университета // Вестник Томского государственного университета. 2007. № 303. С. 55–60.
17. *Залесов В.Г., Манонина Т.Н.* Сибирский период деятельности архитектора П.Ф. Федоровского // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2007. № 1. С. 35–42.
18. *О реорганизации вузов, техникумов и рабфаков* : Постановление Центрального исполнительного комитета СССР Совета народных комиссаров СССР от 23 июля 1930 г. № 237 // Е-Досье : [сайт]. URL: <https://e-ecolog.ru/docs/N00nwjh94MFTMTZtEq7x1/full> (дата обращения: 01.02.2024).

REFERENCES

1. *Boyko V.P., Efimenko V.N., Kadesnikov A.P., Kartopoltsev V.M., Muzalev V.M. (Ed.), Lyakhovich L.S.* Historical essays on road and bridge construction. 2nd ed., Tomsk: TSUAB, 2012. 149 p. (In Russian)
2. *Zalesov V.G.* Russian architectural and construction education in the 19–20th centuries. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2010; (2): 24–34. (In Russian)
3. Report on the state and activities of the Tomsk Technological Institute of Emperor Nicholas II for 1902. Tomsk: V.M. Perelman, 1903. 42 p. (In Russian)
4. *Nikolaeva N.V.* Formation of higher architectural and construction school in Siberia (Tomsk and Novosibirsk). *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012; (3): 219–240. (In Russian)
5. State Archive. Form 126. List 1. File 811. P. 2–3. (In Russian)
6. *Efimov A.I.* Historical note on the establishment and opening of the Tomsk Technological Institute of Emperor Nicholas II on December 6, 1900. Tomsk: P.I. Makushin, 1902. 94 p. (In Russian)
7. *Lozovsky I.T.* Brief Chronicle of TPU: 1985–1991. Tomsk: TPU, 2003. 102 p. (In Russian)
8. *Gagarin A.V.* Professors of Tomsk Polytechnic University, in 2 vol. Vol. 1. Tomsk: NTL, 2000. 297 p. (In Russian)
9. *Khanevich V.A.* Poles in Tomsk (19–20th centuries): Biographies. Tomsk: Publishing House of Tomsk State Pedagogical University, 2012. Pp. 504–506. (In Russian)
10. *Pokholkov Yu.P., Ushakov V.Ya. (Eds)* Formation and development of scientific schools of Tomsk Polytechnic University 1896–1996: Historical essay. Tomsk: TPU, 1996. 249 p. (In Russian)
11. *Galanova R.A.* Efim Lukyanovich Zubashev: Biographical sketch. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2009. 190 p. (In Russian)
12. State Archive. Form 194. List 1. File 16. P. 3. (In Russian)
13. Gudok Publishing House. *Krasnoyarsk Railwayman. Architect of All Siberia*. Available: <https://gudok.ru/zdr/176/?ID=621072&ysclid> (In Russian)
14. *Gagarin A.V.* Professors of Tomsk Polytechnic University: Biographical reference. in 2 vol. Vol. 2. Tomsk: NTL, 2000. 216 p. (In Russian)

15. *Baranovsky G.V.* Gut Fortunat Ferdinandovich. Anniversary collection of activities of former pupils of the Institute of Civil Engineers (Construction School). 1842–1892. Saint-Petersburg: Typo-Lithography of N.L. Pentkovsky, 1893. Pp. 94–95. (In Russian)
16. *Bogdanova O.V.* Civil engineers as builders of Tomsk University. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007; (303): 55–60. (In Russian)
17. *Zalesov V.G., Manonina T.N.* Siberian period of activity of the architect P.F. Fedorovsky. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2007; (1): 35–42. (In Russian)
18. Reorganisation of universities, technical schools and rabfaks: Decree N 237 of the Central Executive Committee of the USSR Council of People's Commissars of the USSR of 23 July 1930. Available: <https://e-ecolog.ru/docs/N00nwjh94MFTMTZtEq7x1/full> (accessed February 1, 2024).

Сведения об авторе

Песков Владислав Михайлович, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, v.m.peskov@mail.ru

Author Details

Vladislav M. Peskov, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, v.m.peskov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.03.2024
Одобрена после рецензирования 03.04.2024
Принята к публикации 30.04.2024

Submitted for publication 21.03.2024
Approved after review 03.04.2024
Accepted for publication 30.04.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 118–133.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 118–133.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.014 + 624.047.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-118-133

EDN: JWJSUT

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОД НАГРУЗКОЙ ДВУХПОЯСНЫХ ВАНТОВЫХ ФЕРМ

Андрей Владимирович Чесноков, Виталий Витальевич Михайлов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Вантовые фермы обладают рядом преимуществ по сравнению с конструкциями из бетона и стали, широко применяемыми в покрытиях зданий и сооружений. Они позволяют перекрыть пролеты до 60 м и более, обладают малым собственным весом и не требуют использования монтажной техники большой грузоподъемности. Вместе с тем разработка проектных решений вантовых конструкций затруднена из-за отсутствия в имеющихся программных комплексах конечно-элементного анализа специализированных инструментов для выполнения вариантной проработки. Аналитические методы расчета вантовых конструкций требуют интегрирования эпюр поперечных сил в фиктивной балке и решения систем нелинейных уравнений, что осложняет выполнение статического анализа. Таким образом, разработка упрощенных полуаналитических методов расчета, реализуемых в общедоступных математических программных комплексах, является важной и актуальной задачей, позволяющей повысить качество проектных решений за счет использования встроенных инструментов численного моделирования и оптимизации.

Цель настоящей работы – разработка усовершенствованной методики статического анализа двухпоясных вантовых ферм.

Методы исследования и результаты. В основе разработанной методики лежит разложение функции формы вантового пояса и внешней нагрузки в тригонометрические ряды. С учетом условия совместности деформаций поясов, вытекающего из предположения о неизменности длин связей между ними, а также предположения о малости вертикального перемещения фермы в центре пролета, получена система двух уравнений. Одно из них является квадратным и имеет известное решение при заданном коэффициенте изменения формы вантовой фермы, который определяется из второго уравнения методом хорд.

Выводы. Предложенная расчетная методика позволяет определить вертикальные перемещения вантовой фермы, контактную нагрузку между поясами и усилия в поясах

при действии внешней нагрузки, равномерно загружающей левую и правую половины пролета. Применение метода одномерного поиска для решения системы нелинейных уравнений требует меньших вычислительных ресурсов по сравнению с общим случаем решения нелинейных систем.

Ключевые слова: вантовая конструкция, вантовая ферма, пологая ванта, гибкая нить, обратно симметричная нагрузка, деформация, тригонометрический ряд

Для цитирования: Чесноков А.В., Михайлов В.В. Анализ работы под нагрузкой двухпоясных вантовых ферм // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 118–133. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-118-133. EDN: JWJSUT

ORIGINAL ARTICLE

STRUCTURAL ANALYSIS OF LOADED CABLE TRUSSES

Andrei V. Chesnokov, Vitalii V. Mikhailov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. Cable trusses are far superior to ordinary roof structures of buildings made of steel or reinforced concrete. They are applicable for spans up to 60 meters or more and do not need heavy-duty installation equipment due to their low weight. On the other hand, design solutions for cable structures are hampered because software packages for the finite element analysis, are not intended for study of alternative solutions. Evaluation methods for the cable truss structure include integration of the shear force distribution in auxiliary beam and solution of a set of non-linear equations. It complicates the implementation of static analysis. The development of simplified evaluation methods suitable for general-purpose mathematical software packages, is an important task to be solved. It will enhance the quality of design solutions via specialized tools for numerical simulation and optimization.

Purpose: The purpose of the work is to develop evaluation methods of cable trusses.

Methodology: The proposed technique is based on the sine-series expansion of the external load and shape function of the cable truss. The assumption of small relative displacement at the center of the truss span and constant length of links between the chords yield a set of two equations. The first one is quadratic. Its solution is given in terms of the cable truss shape alteration determined from the second equation by means of the secant method.

Research findings: The proposed technique allows to determine vertical displacements of the cable truss, the link load between the chords and axial forces under the external load uniformly distributed over left and right parts of the span. Nonlinear equations solved by the plane solution technique, requires much less computations in contrast to the general analysis of non-linear systems.

Keywords: cable truss, shallow cable, flexible cable, antisymmetric load, deformation, trigonometric sequence

For citation: Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Structural analysis of loaded cable trusses. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 118–133. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-118-133. EDN: JWJSUT

Введение

Вантовые строительные конструкции предназначены для большепролетных зданий, обеспечивают свободную планировку внутреннего простран-

ства. В работе [1] выделены области их эффективного применения. Вантовые конструкции включают большую группу так называемых tensegrity-систем, в которых отдельные распорки объединяют непрерывные растянутые элементы [2]. За счет создания предварительного напряжения tensegrity-системы проявляют намного меньшую деформативность, по сравнению с одиночными вантами. Двухпоясные вантовые фермы являются типом tensegrity-систем. Имея плоскую структуру и упрощенное конструктивное решение, вантовые фермы активно используются на практике.

Совершенствование методики расчета вантовых конструкций способствует развитию методов численного моделирования создания предварительных напряжений сложных комбинированных систем, а также вносит вклад в процесс оценки их работоспособного состояния [3, 4].

Для численного анализа вантовых конструкций, проявляющих нелинейное поведение под нагрузкой, предложено использование метода конечных элементов [5, 6]. Итерационные методики, позволяющие получить требуемую точность решения за конечное число шагов, находят широкое применение на практике для расчета нелинейных систем [7, 8].

К числу итерационных подходов принадлежит метод Ньютона – Рафсона, включающий построение касательной матрицы жесткости деформированной конструкции. В работе [9] метод Ньютона – Рафсона применен для определения равновесного состояния вантовой фермы, состоящей из элементарных модулей. Для учета криволинейных вантовых элементов, физически нелинейной работы материала и вариации температуры предложена уточненная матрица жесткости [10].

В работе [11] для получения численного решения нелинейной системы применен итерационный алгоритм Левенберга – Марквардта, который совместно с модифицированным методом Ньютона использован для определения начальных напряжений элементов tensegrity-купола в работе [12].

Применение численных методов требует предварительного задания основных параметров конструкции, к числу которых относятся геометрические размеры, а также площади поперечных сечений и величина предварительного напряжения вантовых элементов. Таким образом, совершенствование аналитических методов расчета вантовых систем является важной и актуальной задачей.

Получение аналитического решения для пространственной вантовой конструкции вместе с тем сопряжено с существенными сложностями и представляет трудоемкую задачу. В работах [13, 14] предлагается переход к эквивалентным плоским моделям тросового купола с получением упрощенного решения. Разбиение вантовой конструкции на подсистемы верхнего и нижнего поясов, объединенные связями, предложено в работе [15].

В работе [16] даны выражения для определения исходных длин вантовых элементов и остаточной контактной нагрузки между поясами равномерно загруженных вантовых ферм. Нахождение распора поясов вантовой фермы производится из решения системы нелинейных уравнений [17, 18]. Для определения коэффициентов нелинейной системы предлагается интегрирование эпюр внутренних усилий в фиктивной балке.

В работе [19] для получения аналитического решения системы нелинейных уравнений предлагается пренебречь изменением распора поясов от действия обратно симметричной нагрузки. Вместе с тем неучет изменения распора ведет к неточностям, допустимым только в упрощенных расчетах.

Из приведенного литературного обзора следует вывод о том, что численные методы расчета вантовых систем проработаны с достаточной полнотой для выполнения практических расчетов в специализированных программных комплексах нелинейного анализа. Тем не менее задание параметров вантовой конструкции и оценка правильности принятых расчетных схем требуют разработки так называемых полуаналитических подходов, реализуемых в программных комплексах математических расчетов общего назначения, обладающих инструментами оптимизации и аппроксимации.

Аналитические подходы к статическому расчету вантовых конструкций, разработанные к настоящему времени, сопряжены с трудоемкими процедурами расчета коэффициентов, включающими построение и интегрирование эпюр поперечных сил или изгибающих моментов в фиктивной шарнирно опертой балке, а также с решением систем нелинейных уравнений. Это представляет сложность при выполнении практических расчетов, затрудняя проработку вариантов на этапе эскизного проектирования.

Целью настоящей работы является разработка усовершенствованной полуаналитической методики статического анализа двухпоясных вантовых ферм, предназначенной для использования в программных комплексах математических расчетов общего назначения.

Методы исследования

Вантовые фермы состоят из гибких пологих поясов, объединенных связями в виде растяжек или распорок. Расчетная схема вантовой фермы приведена на рис. 1.

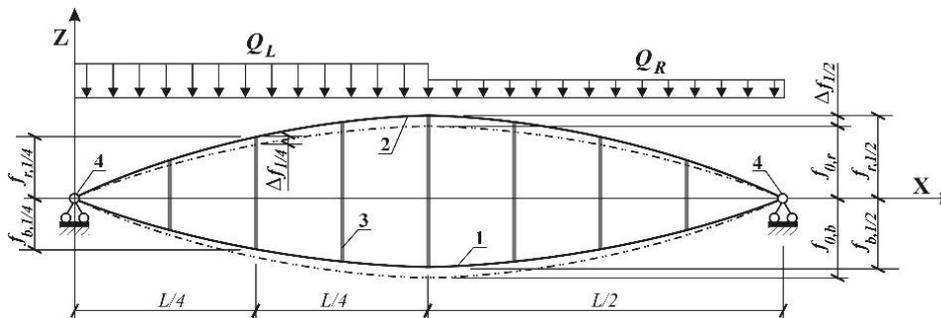


Рис. 1. Расчетная схема двухпоясной вантовой фермы:

1 – несущий пояс; 2 – стабилизирующий пояс; 3 – связь между поясами; 4 – неподвижная опора

Fig. 1. Structural model of cable truss:

1 – bearer chord; 2 – restraining chord; 3 – tie; 4 – fixed support

Приняты следующие предпосылки для выполнения расчетов. Материал исследуемых вантовых ферм работает в линейно-упругой стадии. Опорные

узлы неподвижны и расположены в одной горизонтальной плоскости. Пояса исследуемых ферм являются пологими гибкими вантами, способными воспринимать только растяжение. Отношения ординат в центре пролета (стрел поясов) f к размеру пролета L принадлежат к диапазону $1/24-1/8$. На размер перекрываемого пролета ограничения не наложены. В исходном условно ненапряженном состоянии между поясами создается бесконечно малая равномерная контактная нагрузка, задающая их начальную форму в виде квадратной параболы с начальной стрелой f_0 .

Связи между поясами обладают бесконечной жесткостью. Внешние нагрузки действуют вертикально, а узлы вантовых ферм перемещаются только в вертикальном направлении. Таким образом, ординаты поясов f в деформированном состоянии могут быть выражены через перемещения вантовой фермы Δf следующим образом:

$$f_{b1/2} = f_{0b} - \Delta f_{1/2}; \quad (1a)$$

$$f_{r1/2} = f_{0r} + \Delta f_{1/2}, \quad (16)$$

где b и r – индексы, обозначающие несущий и стабилизирующий пояс соответственно.

Принято, что внешняя нагрузка Q на вантовую ферму состоит из двух частей, равномерно загружающих левую и правую половины пролета: Q_L и Q_R . Положительные направления нагрузок приведены на рис. 1. Нагрузка слева неотрицательна $Q_L \geq 0$, а нагрузка справа не превышает нагрузку слева $Q_R \leq Q_L$. При этом суммарная нагрузка на вантовую ферму положительна $(Q_R + Q_L) > 0$.

Внешняя нагрузка Q , действующая на вантовую ферму, полностью передается на несущий пояс. Таким образом, нагрузки на пояса составят:

– несущий пояс:

$$q_b = Q + P; \quad (2a)$$

– стабилизирующий пояс:

$$q_r = P, \quad (26)$$

где P – контактная нагрузка между поясами.

По аналогии с внешней нагрузкой контактную нагрузку можно представить в виде двух составляющих P_L и P_R . Внешняя и контактная нагрузки разбиваются на сумму равномерной и обратно симметричной частей (индексы Eq и Inv соответственно):

$$Q_L = Q_{Eq} + Q_{Inv}; \quad Q_R = Q_{Eq} - Q_{Inv}; \quad (3)$$

$$P_L = P_{Eq} + P_{Inv}; \quad P_R = P_{Eq} - P_{Inv}. \quad (4)$$

Величины равномерной и обратно симметричной составляющих внешней нагрузки Q_{Eq} и Q_{Inv} находятся из (3) при заданных значениях Q_L и Q_R . Составляющие контактной нагрузки между поясами P_{Eq} и P_{Inv} неизвестны и подлежат определению.

С учетом (2a) и (26) суммарная равномерная и обратно симметричная нагрузки на пояса составят:

– несущий пояс:

$$q_{b,Eq} = Q_{Eq} + P_{Eq} \text{ и } q_{b,Inv} = Q_{Inv} + P_{Inv}; \quad (5)$$

– стабилизирующий пояс:

$$q_{r,Eq} = P_{Eq} \text{ и } q_{r,Inv} = P_{Inv}. \quad (6)$$

Авторы работы [20], применяя аппроксимацию формы ванты и внешней нагрузки при помощи тригонометрических рядов, получили уравнение равновесия:

$$y(x) = \frac{kq_j}{EA} \frac{L^2}{\pi^2} \frac{L_{c0}}{\Delta L} \Psi(x), \quad (7)$$

где $y(x)$ – ордината ванты в локальной системе координат (начало координат находится на левой опоре ванты, локальная ось Y направлена в сторону увеличения ординаты: для стабилизирующего пояса – вверх, для несущего пояса – вниз) в сечении x при $x \in [0..L]$, где L – пролет ванты; EA – продольная жесткость ванты; ΔL – удлинение ванты, равное разности между ее геометрической длиной под нагрузкой L_g и начальной длиной L_{c0} ; j – номер элемента ряда (так называемый базовый индекс, принимаемый в дальнейших расчетах равным единице); kq_j – коэффициент разложения внешней нагрузки $q_g(x)$, распределенной по длине пролета ванты, определяемый при помощи интеграла Фурье [21]; $\Psi(x)$ – функция, зависящая от внешней нагрузки:

$$\Delta L = L_g - L_{c0}; \quad (8)$$

$$kq_j = \frac{2}{L} \int_0^L \left(q_g(x) \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \right) dx; \quad (9)$$

$$\Psi(x) = \sum_{m=1}^{n_M} \frac{k_{m,j}}{m^2} \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{L}\right), \quad (10)$$

где $k_{m,j}$ – приведенные коэффициенты разложения нагрузки, полученные в [20] для $j = 1$ в виде суммы приведенных коэффициентов равномерной части нагрузки k_{m1}^{Eq} и обратно симметричной части k_{m1}^{Inv} :

$$k_{m1}(\eta) = k_{m1}^{Eq} + k_{m1}^{Inv}(\eta), \quad (11)$$

где η – отношение интенсивности обратно симметричной нагрузки, действующей на пояс вантовой фермы q_{Inv} , к интенсивности равномерной нагрузки q_{Eq} :

$$\eta = q_{Inv} / q_{Eq}. \quad (12)$$

Отношение (12) выражено через ординаты пояса в четверти и середине пролета $f_{1/4}$ и $f_{1/2}$ [20]:

$$\eta = 4f_{1/4} / f_{1/2} - 3. \quad (13)$$

Упрощенное выражение для определения геометрической длины ваны по ординате (стреле) в центре пролета в зависимости от соотношения η :

$$L_g \approx \frac{2}{3} \frac{\eta^2 + 4}{L} f_{1/2}^2 + L. \quad (14)$$

В свою очередь, начальная недеформированная длина L_{c0} представляет собой разность геометрической длины пояса в исходном положении L_{g0} и заданного натяжения ΔL_p , необходимого для создания предварительных напряжений в вантовой ферме:

$$L_{c0} = L_{g0} - \Delta L_p. \quad (15)$$

Длина пояса в исходном положении L_{g0} находится из (14) при заданной начальной стреле f_0 и соотношении $\eta = 0$, соответствующем равномерной нагрузке.

Результаты

В соответствии с (9), коэффициенты разложения нагрузки, состоящей из суммы равномерной Eq и обратно симметричной Inv частей, $q_g = q_{Eq} + q_{Inv}$ являются суммой коэффициентов:

$$kq_j = kq_j^{Eq} + kq_j^{Inv}. \quad (16)$$

В свою очередь, все нечетные коэффициенты разложения обратно симметричной нагрузки, включая kq_1^{Inv} , равны нулю, а для базового индекса ($j = 1$) можно записать:

$$kq_1 = kq_1^{Eq1} \cdot q_{Eq}, \quad (17)$$

где q_{Eq} – интенсивность равномерной части нагрузки, действующей на ванту; $kq_1^{Eq1} = 4/\pi$ – коэффициент разложения (9) равномерно распределенной нагрузки единичной интенсивности, имеющий индекс $j = 1$.

Учитывая (17) и значение функции (10) для центра пролета, равное $\Psi_{1/2} = \pi^3/32$, уравнение (7) запишем в виде

$$\frac{f_{1/2}}{q_{Eq}} = \frac{\rho}{\Delta L}, \quad (18)$$

где ρ – коэффициент:

$$\rho = \frac{L^2 \cdot L_{c0}}{8 \cdot EA}. \quad (19)$$

Учитывая (5) и (6), запишем (18) и (12) для поясов фермы в центре пролета: – для несущего пояса:

$$\frac{f_{b1/2}}{Q_{Eq} + P_{Eq}} = \frac{\rho_b}{\Delta L^b}; \quad (20a)$$

$$\eta_b = \frac{Q_{Inv} + P_{Inv}}{Q_{Eq} + P_{Eq}}; \quad (20б)$$

– для стабилизирующего пояса:

$$\frac{f_{r1/2}}{P_{Eq}} = \frac{\rho_r}{\Delta L'}; \quad (21а)$$

$$\eta_r = P_{Inv} / P_{Eq}, \quad (21б)$$

где ρ_b и ρ_r – коэффициенты, определяемые для несущего и стабилизирующего поясов по (19).

Из (20б) и (21б) получим зависимость между соотношениями η_b и η_r :

$$\eta_b = \frac{Q_{Inv} + \eta_r \cdot P_{Eq}}{Q_{Eq} + P_{Eq}}. \quad (22)$$

Из (13), учитывая (1), выразим отношения обратно симметричной к равномерной нагрузке для несущего и стабилизирующего поясов в зависимости от вертикальных перемещений вантовой фермы в середине и четверти пролета $\Delta f_{1/2}$ и $\Delta f_{1/4}$:

$$\eta_b = \frac{\lambda}{\Delta f_{1/2} - f_{0b}} \Delta f_{1/2}; \quad (23а)$$

$$\eta_r = \frac{\lambda}{\Delta f_{1/2} + f_{0r}} \Delta f_{1/2}, \quad (23б)$$

где λ – коэффициент изменения формы вантовой фермы:

$$\lambda = 4\Delta f_{1/4} / \Delta f_{1/2} - 3. \quad (24)$$

Из (20а), с учетом (8), (14), (21а), (23а) и (23б), получено кубическое уравнение от неизвестного вертикального перемещения вантовой фермы в середине пролета $\Delta f_{1/2}$:

$$\Delta f_{1/2}^3 + A_2 \cdot \Delta f_{1/2}^2 + A_1 \cdot \Delta f_{1/2} + A_0 = 0. \quad (25а)$$

Вертикальное перемещение в середине пролета $\Delta f_{1/2}$ определяется упругими деформациями поясов, а не изменением формы вантовой фермы. Таким образом, величина данного перемещения существенно меньше ее габаритных размеров, а кубическое уравнение может быть редуцировано до уравнения второй степени:

$$A_2(\lambda) \cdot \Delta f_{1/2}^2 + A_1 \cdot \Delta f_{1/2} + A_0 = 0. \quad (25б)$$

где A_0 , A_1 – коэффициенты; A_2 – функция, зависящая от параметра λ :

$$A_2(\lambda) = \frac{2 \rho_b \cdot f_{0r} - \rho_r \cdot f_{0b}}{3} \frac{(\lambda^2 + 12)}{L}; \quad (26а)$$

$$A_1 = 8 \frac{\rho_b \cdot f_{0r}^2 + \rho_r \cdot f_{0b}^2}{L} + L(\rho_b + \rho_r) - (\rho_b \cdot L_{c0}^r + \rho_r \cdot L_{c0}^b); \quad (26б)$$

$$A_0 = \frac{8}{3} \frac{\rho_b \cdot f_{0r}^3 - \rho_r \cdot f_{0b}^3}{L} + L(\rho_b \cdot f_{0r} - \rho_r \cdot f_{0b}) + \dots \\ \dots + \rho_r \cdot f_{0b} \cdot L_{c0}^b - \rho_b \cdot f_{0r} \cdot L_{c0}^r + Q_{Eq} \cdot \rho_b \cdot \rho_r. \quad (26в)$$

Коэффициенты ρ_b и ρ_r для несущего и стабилизирующего поясов определяются по (19).

При условии $A_2 \neq 0$, которое обеспечено при

$$\rho_b \cdot f_{0r} \neq \rho_r \cdot f_{0b}, \quad (27а)$$

а также при условии

$$\zeta(\lambda) = A_1^2 - 4A_2(\lambda)A_0 \geq 0, \quad (27б)$$

решение (25б) запишем в следующем виде:

$$\Delta f_{1/2}(\lambda) = \frac{-A_1 + \sqrt{\zeta(\lambda)}}{2A_2(\lambda)}. \quad (28)$$

При невыполнении условий (27) вертикальное перемещение вантовой фермы в середине пролета $\Delta f_{1/2}$ не зависит от параметра λ и определяется из решения линейного уравнения, полученного из (25б) при $A_2 = 0$:

$$\Delta f_{1/2} = -A_0 / A_1. \quad (29)$$

Равномерная часть контактной нагрузки между поясами P_{Eq} , а также отношения η_b и η_r должны удовлетворять равенству (22), которое запишем в виде нелинейного уравнения одной переменной λ :

$$F(\lambda) = 0, \quad (30)$$

где

$$F(\lambda) = \frac{Q_{Inv} + \eta_r(\lambda)P_{Eq}(\lambda)}{Q_{Eq} + P_{Eq}(\lambda)} - \eta_b(\lambda). \quad (31)$$

Здесь $\eta_b(\lambda)$ и $\eta_r(\lambda)$ – функции (23а) и (23б); $P_{Eq}(\lambda)$ – функция, полученная из (21а) при учете, что входящие в (21а) элементы $f_{r1/2}$ и ΔL^r зависят от вертикального перемещения вантовой фермы в центре пролета $\Delta f_{1/2}$, которое, в свою очередь, определяется из (28) при заданном λ ; Q_{Eq} , Q_{Inv} – симметричная и обратно симметричная составляющие заданной внешней нагрузки.

Для решения уравнения (30) предлагается применить метод хорд. Поиск решения производится в диапазоне $\lambda_L \dots \lambda_R$, где границы диапазона принимаются из условия

$$F(\lambda_L)F(\lambda_R) \leq 0. \quad (32)$$

В случае если значение функции (31) на одной из границ равно нулю, $F(\lambda^*) = 0$, решение найдено: $\lambda = \lambda^*$, иначе – производится итерационный поиск. На каждой итерации определяется промежуточная точка λ_M :

$$\lambda_M = \frac{|F(\lambda_R)|\lambda_L + |F(\lambda_L)|\lambda_R}{|F(\lambda_R)| + |F(\lambda_L)|}. \quad (33)$$

Границы диапазона поиска меняются следующим образом. При $F(\lambda_R)F(\lambda_M) > 0$ отбрасывается часть интервала, находящаяся правее точки λ_M (т. е. принимается $\lambda_R = \lambda_M$), в противном случае отбрасывается левая часть интервала (принимается $\lambda_L = \lambda_M$). Итерационный процесс поиска решения завершается при достижении заданной степени точности:

$$|F(\lambda_M)| < \mu_\varepsilon, \quad (34)$$

где μ_ε – величина допустимой ошибки.

В качестве решения принимается $\lambda = \lambda_M$.

Невозможность задания начального диапазона поиска $\lambda_L \dots \lambda_R$ по условию (32) означает, что решение λ стремится к $\pm\infty$, а вертикальное перемещение вантовой фермы в центре пролета, с учетом (24), стремится к нулю: $\Delta f_{1/2} \rightarrow 0$. В этом случае задача нахождения параметра λ заменяется задачей определения вертикального перемещения вантовой фермы в четверти пролета $\Delta f_{1/4}$ при отсутствии перемещения в центре:

$$\Delta f_{1/2} = 0. \quad (35)$$

Учитывая (24), при условии (35), запишем отношения (23а) и (23б) в виде функций от перемещения $\Delta f_{1/4}$:

$$\eta_b(\Delta f_{1/4}) = -4\Delta f_{1/4} / f_{0b}; \quad (36a)$$

$$\eta_r(\Delta f_{1/4}) = 4\Delta f_{1/4} / f_{0r}. \quad (36b)$$

Поиск решения производится методом хорд с использованием функции (31), выраженной через искомое перемещение:

$$F(\Delta f_{1/4}) = \Delta f_{1/4}^3 + C_1 \cdot \Delta f_{1/4} + C_0 \rightarrow 0, \quad (37)$$

где
$$C_1 = \frac{3}{32} L \left(\frac{8}{3} \frac{f_{0r}^2}{L} + Q_{Eq} \frac{\rho_r}{f_{0r} + f_{0b}} + L - L_{c0}^r \right); \quad (38a)$$

$$C_0 = \frac{3}{128} L \frac{f_{0b} \cdot \rho_r}{f_{0r} + f_{0b}} Q_{Inv}. \quad (38b)$$

Рассмотрена двухпоясная вантовая ферма пролетом $L = 60$ м. В качестве материала поясов приняты высокопрочные стальные ванты с модулем упругости $E = 1,48 \cdot 10^4$ кН/см². Площади поперечных сечений несущего и стабилизирующего поясов: $A_b = 20,0$ см² и $A_r = 13,0$ см². На стадии предварительного напряжения распоры и стрелы поясов фермы составляют: $H_{pr,b} = H_{pr,r} = 588,6$ кН и $f_{b1/2}^{pr} = f_{r1/2}^{pr} = 4,02$ м [18, 22].

Геометрические длины поясов на стадии предварительного напряжения $L_{g,pr}^b$ и $L_{g,pr}^r$ найдены по (14) при заданных стрелах $f_{b1/2}^{pr}$, $f_{r1/2}^{pr}$ и коэффициен- те, соответствующем равномерной нагрузке $\eta = 0$. Приняв равномерное рас- пределение усилий по длине вант, находим относительные деформации поясов

при преднапряжении: $\varepsilon_{pr,b} = H_{pr,b} / EA_b = 1,987 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_{pr,r} = H_{pr,r} / EA_r = 3,056 \cdot 10^{-3}$. По закону Гука найдены начальные недеформированные длины поясов в исходном (ненапряженном) состоянии $L_{c0} = L_{g,pr} / (1 + \varepsilon_{pr})$ при известных длинах и относительных деформациях на стадии преднапряжения: $L_{c0}^b = 60,59785$ м и $L_{c0}^r = 60,53322$ м.

Принято, что предварительное напряжение вантовой фермы создается натяжением несущего пояса. Таким образом, геометрическая длина стабилизирующего пояса в исходном состоянии совпадает с начальной недеформированной длиной $L_{g0}^r = L_{c0}^r$. Стрела стабилизирующего пояса в исходном состоянии найдена из (14) при $\eta = 0$: $f_{0r} = 3,4637$ м.

Стрела несущего пояса в исходном состоянии найдена из условия недеформируемости распорок, объединяющих пояса, и, как следствие, сохранения неизменным расстояния между поясами: $f_{0b} = 4,5763$ м. Геометрическая длина несущего пояса в исходном состоянии $L_{g0}^b = 60,93076$ м найдена по (14) при известной стреле f_{0b} и коэффициенте $\eta = 0$. По разности геометрической и начальной недеформированной длины несущего пояса найдено его натяжение, необходимое для создания предварительного напряжения вантовой фермы: $\Delta L_p = 0,3329$ м (15).

Выполнено сравнение полученных результатов (обозначены индексом g) с результатами расчета вантовой фермы в специализированном программном комплексе MAV.Structure [23] (индекс M). Вертикальное перемещение в центре пролета при преднапряжении: $\Delta f_{pr,g} = f_{pr,r} - f_{0r} = 0,5563$ м. Расхождение с результатом MAV.Structure $\Delta f_{pr,M} = 0,5709$ м составляет 2,6 %.

Принято загрузить только левую половину пролета вантовой фермы $Q_R = 0,0$ (см. рис. 1). Интенсивность нагрузки выражена параметрически [18]:

$$Q_L = q_0 \cdot k_{Ld}, \quad (39)$$

где $q_0 = 8,91$ кН/м; k_{Ld} – параметр (коэффициент увеличения нагрузки).

Для удобства сравнения вычислены вертикальные перемещения относительно преднапряженного состояния вантовой фермы Δz_g :

$$\Delta z_g = \Delta f_{Ld,g} - \Delta f_{pr,g}, \quad (40)$$

где $\Delta f_{pr,g}$, $\Delta f_{Ld,g}$ – вертикальные перемещения при преднапряжении и при действии внешней нагрузки относительно исходного состояния вантовой фермы, полученные по предложенной методике.

При $k_{Ld} = 8,0$ расхождения полученных по предложенной методике перемещений в четверти и центре пролета $\Delta z_{1/4g} = -1822,9$ мм и $\Delta z_{1/2g} = -975,4$ мм от результатов программного комплекса MAV.Structure $\Delta z_{1/4M} = -1770,1$ мм и $\Delta z_{1/2M} = -977,9$ мм составляют 2,94 и 0,26 % соответственно. Усилия в поясах вантовой фермы получены исходя из условия их упругой работы:

$N_{b,g} = 3534,5$ кН и $N_{r,g} = 287,8$ кН. При этом длины поясов под нагрузкой получены по (14), с учетом (1) и (13), при найденных перемещениях. Расхождения с результатами MAV.Structure $N_{b,M} = 3373,2$ кН и $N_{r,M} = 285,1$ кН составляют 4,67 и 0,94 % соответственно.

Сравнение перемещений вантовой фермы с результатами работ других авторов приведено на рис. 2. На оси абсцисс обозначены вертикальные перемещения на расстоянии $L/3$ от левой опоры. На оси ординат приведены значения внешней нагрузки, соответствующие коэффициенту $k_{Ld} = 1-8$ (39). Графики 1 и 2 иллюстрируют результаты, полученные в [18, 22]. Перемещения, приведенные на графике 3, найдены по предлагаемой в настоящей работе методике (40).

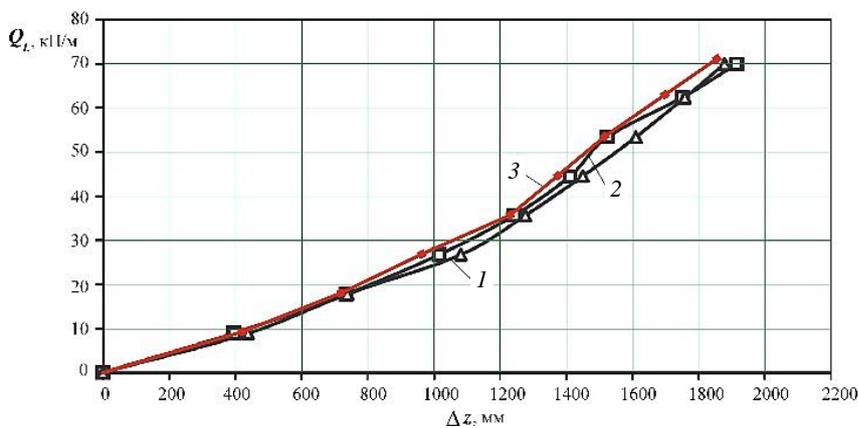


Рис. 2. Вертикальные перемещения вантовой фермы:

1, 2 – решения, полученные в [18] и [22] соответственно; 3 – значения, полученные по предлагаемой методике

Fig. 2. Vertical displacements of cable truss:

1, 2 – works [18] and [22], respectively; 3 – this work

Приведенное сравнение показывает хорошее соответствие результатов статического расчета двухпоясной вантовой фермы, полученных по предложенной методике, работам других авторов, а также результатам специализированного программного комплекса MAV.Structure. Таким образом, разработанная полуаналитическая методика расчета позволяет получить достаточно точные с практической точки зрения результаты.

Заключение

Двухпоясные вантовые фермы относятся к числу основных несущих элементов облегченных строительных конструкций большепролетных покрытий зданий и сооружений. Их применение способствует освоению отдаленных и труднодоступных территорий с недостаточно развитой инфраструктурой. Таким образом, совершенствование методов их расчета и проектирования является важной и актуальной задачей.

Предложена упрощенная полуаналитическая методика статического анализа двухпоясных вантовых ферм, усовершенствованная в части применения метода одномерного поиска для решения системы нелинейных уравнений, использование которого требует меньших вычислительных ресурсов в сравнении с общим случаем решения нелинейных систем.

Методика применима для широко распространенного на практике случая действия внешней нагрузки, равномерно загружающей левую и правую половины пролета и представленной в виде суммы равномерной нагрузки по всему пролету и обратно симметричной нагрузки.

Методика основана на применении уравнения равновесия гибкой ванта, полученного методом разложения функции формы ванта и внешней нагрузки в тригонометрические ряды. Предложены уравнения для нахождения перемещений в центре и четверти пролета. По найденным перемещениям определяются нагрузки на пояса вантовой фермы и усилия в поясах.

Результаты применения предложенной методики находятся в близком соответствии с результатами, полученными другими авторами, а также с результатами геометрически нелинейного статического анализа в специализированном программном комплексе MAV.Structure.

Предложенная усовершенствованная методика позволит повысить глубину вариантной проработки вантовых конструкций на ранней стадии разработки проекта за счет ее реализации в общедоступных математических программных комплексах, обладающих широким набором инструментов численного моделирования, оптимизации и обработки полученных результатов.

Дальнейшее совершенствование предложенной методики находится в области учета произвольных нагрузок на вантовую ферму, смещений опор и температурных воздействий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Еремеев П.Г.* Висячие конструкции // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 62–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67
2. *Еремеев П.Г.* Вантовая комбинированная конструктивная система «Тенсегрити» // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 1. С. 21–27. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.21-27
3. *Yu Z., Jiamin G., Zhiyu J., Weigang C., Guang Z.* Control method for determining feasible pre-stresses of cable-struts structure // Thin-Walled Structures. 2022. V. 174. Article 109159. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109159
4. *Yuan P., He B., Nie R., Zhang L., Yu H., Wang W., Ma X.* Member importance prediction and failure response analysis for cable network antennas // Engineering Structures. 2022. V. 266. Article 114642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114642
5. *Talvik I.* Finite element modelling of cable networks with flexible supports // Computers and Structures. 2001. V. 79. I. 26–28. P. 2443–2450.
6. *Zhang A., Shangguan G., Zhang Y., Zou M., Luo C.* Structural behavior of a fully assembled cable-piercing ridge-tube cable dome with modular assembly ring truss // Journal of Constructional Steel Research. 2023. V. 211. Article 108193. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108193
7. *Дроздов В.В., Пиеничкина В.А., Строк С.И.* Расчет несущих строительных конструкций уникальных высотных и большепролетных зданий с учетом физической и геометрической нелинейности. Волгоград: ВолгГТУ, 2020. 100 с.
8. *Gasparini D., Gautam V.* Geometrically nonlinear static behavior of cable structures // Journal of Structural Engineering. 2002. № 128 (10). P. 1317–1329.

9. Ma S., Yuan X.F., Deng M., Yang L. Minimal mass design of a new cable truss in two states // *Mechanics Research Communications*. 2022. V. 125. Article 103995. DOI: 10.1016/j.mechres-com.2022.103995
10. Costa R.S., Lavall A.C.C., Lanna da Silva R.G., Porcino dos Santos A., Viana H.F. Cable structures: an exact geometric analysis using catenary curve and considering the material non-linearity and temperature effect // *Engineering Structures*. 2022. V. 253. Article 113738. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113738
11. Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P., Shen Y., Fu W. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: computational framework and structural feasibility investigation // *Engineering Structures*. 2023. V. 286. Article 116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028
12. Feng Y., Yuan X.F., Samy A. Analysis of new wave-curved tensegrity dome // *Engineering Structures*. 2022. V. 250. Article 113408. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113408
13. Krishnan S. Structural design and behavior of prestressed cable domes // *Engineering Structures*. 2020. V. 209. Article 110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294
14. Wang Z., Yuan X., Dong S. Simple approach for force finding analysis of circular Geiger domes with consideration of self-weight // *Journal of Constructional Steel Research*. 2010. V. 66. I. 2. P. 317–322. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.09.010
15. Li X., Xue S. Prestress design and geometric correction method of cable–truss structures based on equivalent equilibrium force model // *Thin-Walled Structures*. 2023. V. 191. Article 111058. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111058
16. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. Москва : Стройиздат, 1983. 215 с.
17. Sadaoui A., Lattari K., Khennane A. A novel analytical method for the analysis of a bi-concave cable-truss footbridge // *Engineering Structures*. 2016. V. 123. P. 97–107. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.025
18. Kmet S., Kokorudova Z. Non-linear closed-form computational model of cable trusses // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2009. V. 44. I. 7. P. 735–744. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2009.03.004
19. Москалев Н.С. Конструкции висячих покрытий. Москва : Стройиздат, 1980. 336 с.
20. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Analysis of cable structures by means of trigonometric series // *Structural membranes 2017 : материалы Международной конференции, 9–11 октября 2017 г. Мюнхен, Германия, 2017. С. 455–466. URL: <http://congress.cimne.com/membranes2017/frontal/Doc/Ebook2017.pdf> (дата обращения: 13.02.2024).*
21. Tolstov G.P. *Fourier Series*. New York : Dover Publications, 2012. 352 p.
22. Kassimali A., Parsi-Feraidoonian H. Strength of cable trusses under combined loads // *Journal of Structural Engineering*. 1987. № 113. I. 5. P. 907–924.
23. MAV.Structure. *Расчет конструкций методом конечных элементов*. URL: <http://www.bridg-geart.ru/cad/59-cad/519-mavstructure.html> (дата обращения: 13.02.2024).

REFERENCES

1. Eremeev P.G. Suspended structures. *Stroitel'nye materialy*. 2022; 10: 62–67. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-807-10-62-67 (In Russian)
2. Eremeev P.G. Hybrid cable structural system “Tensegrity”. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021; 1: 21–27. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.21-27 (In Russian)
3. Yu Z., Jiamin G., Zhiyu J., Weigang C., Guangen Z. Control method for determining feasible pre-stresses of cable-struts structure. *Thin-Walled Structures*. 2022; 174: 109159. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109159
4. Yuan P., He B., Nie R., Zhang L., Yu H., Wang W., Ma X. Member importance prediction and failure response analysis for cable network antennas. *Engineering Structures*. 2022; 266: 114642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114642
5. Talvik I. Finite element modelling of cable networks with flexible supports. *Computers and Structures*. 2001; 79 (26–28): 2443–2450.

6. Zhang A., Shanguan G., Zhang Y., Zou M., Luo C. Structural behavior of a fully assembled cable-piercing ridge-tube cable dome with modular assembly ring truss. *Journal of Constructional Steel Research*. 2023; 211: 108193. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108193
7. Drozdov V.V., Pshenichkina V.A., Strok S.I. Structural analysis of unique high-rise and long-span buildings with respect to physical and geometric nonlinearity. Volgograd, 2020. 100 p. (In Russian)
8. Gasparini D., Gautam V. Geometrically nonlinear static behavior of cable structures. *Journal of Structural Engineering*. 2002; 128 (10): 1317–1329.
9. Ma S., Yuan X.F., Deng M., Yang L. Minimal mass design of a new cable truss in two states. *Mechanics Research Communications*. 2022; 125: 103995. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2022.103995
10. Costa R.S., Lavall A.C.C., Lanna da Silva R.G., Porcino dos Santos A., Viana H.F. Cable structures: An exact geometric analysis using catenary curve and considering the material nonlinearity and temperature effect. *Engineering Structures*. 2022; 253: 113738. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113738
11. Xue Y., Luo Y., Wang Y., Xu X., Wan H.P., Shen Y., Fu W. A new configuration of Geiger-type cable domes with sliding ridge cables: computational framework and structural feasibility investigation. *Engineering Structures*. 2023; 286: 116028. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.116028.
12. Feng Y., Yuan X.F., Samy A. Analysis of new wave-curved tensegrity dome. *Engineering Structures*. 2022; 250: 113408. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113408
13. Krishnan S. Structural design and behavior of prestressed cable domes. *Engineering Structures*. 2020; 209: 110294. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110294
14. Wang Z., Yuan X., Dong S. Simple approach for force finding analysis of circular Geiger domes with consideration of self-weight. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010; 66 (2): 317–322. DOI: 10.1016/j.jcsr.2009.09.010
15. Li X., Xue S. Prestress design and geometric correction method of cable–truss structures based on equivalent equilibrium force model. *Thin-Walled Structures*. 2023; 191: 111058. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111058
16. Trushchev A.G. Spatial metal structures. Moscow: Stroiizdat, 1983. 215 p. (In Russian)
17. Sadaoui A., Lattari K., Khemane A. A novel analytical method for the analysis of a bi-concave cable-truss footbridge. *Engineering Structures*. 2016; 123: 97–107. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.05.025
18. Kmet S., Kokorudova Z. Non-linear closed-form computational model of cable trusses. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2009; 44 (7): 735–744. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2009.03.004
19. Moskalev N.S. Suspended roof structures. Moscow: Stroiizdat, 1980. 336 p. (In Russian)
20. Chesnokov A.V., Mikhailov V.V. Analysis of cable structures by means of trigonometric series. In: *Proc. Int. Conf. 'Structural Membranes 2017'*, Munchen, Germany, 9-11 October 2017. P. 455–466. Available: <http://congress.cimne.com/membranes2017/frontal/Doc/Ebook2017.pdf> (accessed February 13, 2024).
21. Tolstov G.P. Fourier Series. New York: Dover Publications, 2012. 352 p.
22. Kassimali A., Parsi-Feraidoonian H. Strength of cable trusses under combined loads. *Journal of Structural Engineering*. 1987; 113 (5): 907–924.
23. MAV.Structure. Finite element analysis of structures. Available: www.bridgeart.ru/cad/59-cad/519-mavstructure.html (accessed February 13, 2024). (In Russian)

Сведения об авторах

Чесноков Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, Липецкий государственный технический университет, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, andreychess742@mail.ru

Михайлов Виталий Витальевич, докт. техн. наук, профессор, Липецкий государственный технический университет, 398055, г. Липецк, ул. Московская, 30, mmvv46@rambler.ru

Authors Details

Andrei V. Chesnokov, PhD, A/Professor, Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., 398055, Lipetsk, Russia, andreychess742@mail.ru

Vitalii V. Mikhailov, DSc, Professor, Lipetsk State Technical University, 30, Moskovskaya Str., 398055, Lipetsk, Russia, mmvv46@rambler.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.02.2024
Одобрена после рецензирования 25.02.2024
Принята к публикации 05.03.2024

Submitted for publication 15.02.2024
Approved after review 25.02.2024
Accepted for publication 05.03.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 134–142.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 134–142.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142

EDN: JCCLBV

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА НА РАЗЛИЧНОЙ СТАДИИ РАБОТЫ СТАЛИ

Иван Иванович Подшивалов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Объектом исследования являются прочность и устойчивость металлического каркаса в условиях линейной и физически нелинейной работы стали по билинейной диаграмме при статическом нагружении.

Цель работы состоит в анализе прочности металлического каркаса с применением коэффициента конструктивной прочности в линейном расчете и коэффициента использования несущей способности, определенного на основании теории расчета по предельной поверхности элементов, а также линейной и физически нелинейной устойчивости на основе концепции предельной отпорности системы.

Методы исследования. Расчетное обоснование прочности и устойчивости металлического каркаса на различной стадии работы стали выполнено в программном комплексе Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели.

Результаты. Получены результаты, когда при обеспечении конструктивной прочности и несущей способности металлического каркаса, а также его линейной устойчивости критический параметр в условиях физически нелинейной устойчивости оказался меньше нормируемого значения, в результате чего не выполняется условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний.

Ключевые слова: металлический каркас, прочность, несущая способность, устойчивость, линейная и нелинейная работа, расчетная модель

Для цитирования: Подшивалов И.И. Прочность и устойчивость металлического каркаса на различной стадии работы стали // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 134–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142. EDN: JCCLBV

ORIGINAL ARTICLE

**STRENGTH AND STABILITY OF METAL FRAME
AT DIFFERENT STAGES OF STEEL PERFORMANCE****Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The object of the study is the strength and stability of the metal frame during linear and nonlinear steel operation according to a bilinear diagram under static loading.

Purpose: The analysis of the metal frame strength using the structural strength factor in the linear calculation and the load-bearing capacity use factor in theoretical calculation of the limit element surface as well as the linear and nonlinear stability based on the concept of the system limit repulsion.

Methodology: The computational substantiation of the bearing capacity and stability of the reinforced concrete frame at different stages of materials performance, is carried out in the Ing+2021 MicroFe program with the proposed finite element spatial model.

Research findings: At the structural strength and bearing capacity of the metal frame and its linear stability, the critical parameter at physically nonlinear stability is less than the standardized value, as a result of which the metal frame stability is not fulfilled for ultimate limit state.

Keywords: metal frame; strength, bearing capacity, stability, linear and nonlinear work, calculation model

For citation: Podshivalov I.I. Strength and stability of metal frame at different stages of steel performance. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 134–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142. EDN: JCCLBV

Обеспечение прочности и устойчивости при проектировании металлических конструкций является условием выполнения предельных состояний первой группы [1, 2]. В то же время обеспечение несущей способности, основанной на недопустимости достижения предельных состояний, при проектировании и эксплуатации строительных конструкций довольно часто не выполняется и может привести к негативным последствиям [3, 4]. В стержневых конструкциях отказ одного элемента, вследствие достижения им аварийного состояния, может вызвать цепную реакцию отказов других стержневых элементов, приводя к частичной или к полной потере несущей способности здания или сооружения [5, 6].

Расчет на прочность стержневых элементов стальных конструкций выполняется по предельному состоянию в наиболее нагруженном сечении с заданными относительными эксцентриситетами, из которого определяются внутренние усилия с учетом упругой работы материала при динамических нагрузках или упругопластической работы материала при статических нагрузках [7, 8]. Расчет стержневых металлических систем в нелинейной постановке можно выполнить по теории предельных поверхностей по методике, приведенной, например, в работе [9], где по экспериментальным результатам испытания железобетонных колонн в нелинейной деформационной модели построены области прочности нормального сечения «N-M-M» и «N-e-e», получены их огибающие поверхности, проведена оценка влияния варьируемых

параметров на прочность и разработаны рекомендации по обоснованию прочности при косом внецентренном сжатии.

Благодаря использованию расчетных программ в проектировании стало возможным выполнение расчета стержневых систем путем непосредственного анализа их равновесия с учетом перемещений от внешних воздействий – расчет по деформированной схеме. При этом появилась возможность проверки общей устойчивости всего сооружения, в отличие от поэлементной проверки устойчивости по нормам проектирования [10].

При расчете устойчивости стержневых элементов стальных конструкций с учетом физической нелинейности аналитическое решение деформационной задачи сжато-изогнутых в двух плоскостях упругих стержней может быть построено с учетом физической нелинейности стали путем дополнительного догружения упругого стержня фиктивной силой с двухосными эксцентриситетами [11].

В концепции расчета конструкций по предельному поведению В.В. Катюшина в рамных конструкциях может возникнуть ситуация, когда сложно определить критерии их предельного состояния и, как следствие, необходимые запасы прочности и устойчивости [12]. Так, изменения общих характеристик элементов, таких как продольная и изгибная жесткости, отпорность, которые могут быть обусловлены локальными пластическими деформациями, влияют на глобальное поведение всей системы, содержащей эти элементы.

По вышеприведенной концепции В.В. Катюшина А.В. Перельмутер понятие «предельное состояние» дополняет характеристикой поведения системы, которая определяется скоростью изменения реакции системы при изменении внешнего воздействия [13]. В качестве измерителя предлагается использовать уменьшение угла наклона кривой состояний равновесия, которое характеризует потерю отпорности, что может быть применено для оценки близости конструкции к состоянию отказа, которое возникает при нулевой отпорности системы.

В настоящей статье объектом исследования является металлический каркас здания склада. Размеры здания в плане – 15×36 м, номинальная высота до низа конструкций покрытия – 6,8 м (рис. 1).

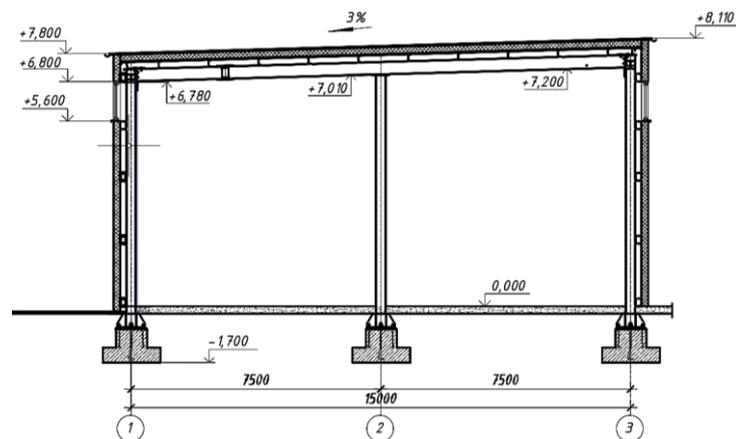


Рис. 1. Схема поперечного разреза металлического каркаса

Fig. 1. Schematic of the cross section of the metal frame

Каркас здания выполнен по рамно-связевой схеме. Продольная устойчивость каркаса обеспечивается вертикальными связями по колоннам, а поперечная устойчивость – за счет статической работы двух пролетных рам. Пролет рам – 7,5 м, шаг – 6,0 м и высота – 6,8 м. Сопряжение с фундаментом колонн рам, выполненных из прокатного двутавра I30K1, жесткое. Несущими конструкциями покрытия являются металлические балки, выполненные из широкополочного двутавра I40Ш1, по которым уложены прогоны покрытия, устроенные из швеллеров U22, с шагом 1,5 м. Сопряжение балок покрытия с крайними колоннами жесткое, опирание балок покрытия на средние колонны выполнено по неразрезной схеме. Несущие ограждающие конструкции каркаса устроены из металлических сэндвич-панелей: стеновых и кровельных. Уклон кровли составляет 3 %.

В программном комплексе Ing+2021 MicroFe с использованием стержневых конечных элементов была разработана конечно-элементная модель металлического каркаса (рис. 2). Все нагрузки статические.

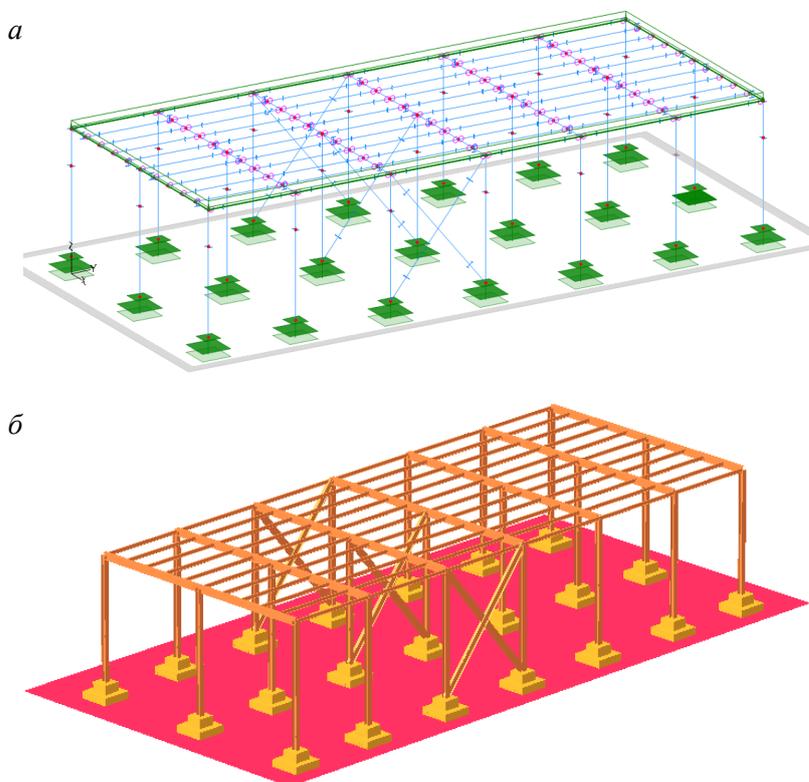


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б) (прогоны под колоннами для крепления стеновых сэндвич-панелей условно не показаны)

Fig. 2. FEM (a) and model visualization (b)

В расчетной модели были рассмотрены четыре расчетные схемы:

– расчетная схема № 1 – линейный расчет металлического каркаса на прочность и жесткость;

– расчетная схема № 2 – нелинейный расчет металлического каркаса по теории предельных поверхностей конструктивных элементов;

– расчетная схема № 3 – линейный расчет металлического каркаса на устойчивость;

– расчетная схема № 4 – физически нелинейный расчет металлического каркаса на устойчивость по концепции предельной отпорности с применением основной формы собственных колебаний с минимальным значением коэффициента использования критической нагрузки. Здесь заданы следующие характеристики билинейной диаграммы деформирования стали: предел пропорциональности – 200 МПа; максимальное напряжение в крайней точке диаграммы – 250 МПа; модуль упругости на линейном участке – 206 ГПа; модуль упругости в крайней точке диаграммы равен нулю.

Расчетная схема № 1. Изополя коэффициента использования конструктивной прочности в элементах металлического каркаса приведены на рис. 3, который демонстрирует, что наибольший уровень нагружения отмечен в колоннах с максимальным значением коэффициента использования сечения по условию устойчивости плоской формы изгиба $\max K_{ик} = 0,97 < 1$. Отсюда следует, что условие прочности по первой группе предельных состояний для элементов металлического каркаса выполнено.

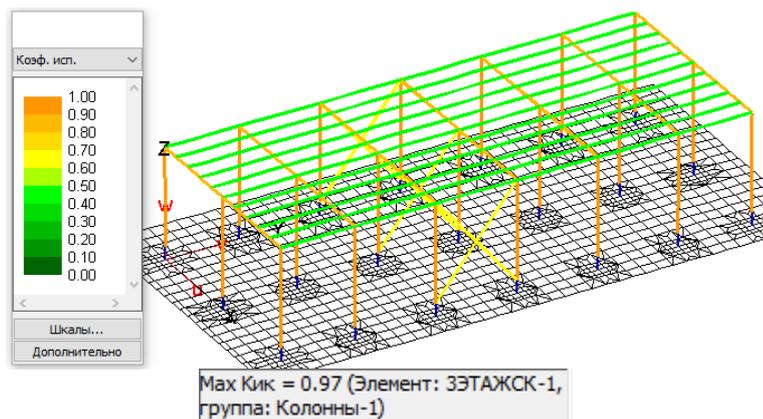


Рис. 3. Изополя коэффициента использования конструктивной прочности в элементах металлического каркаса в расчетной схеме № 1

Fig. 3. Isofields of strength use factor in metal frame elements in design model 1

Расчетная схема № 2. Изополя коэффициента использования несущей способности, определенного по предельной поверхности элементов (рис. 4), показывают, что его максимальное значение в наиболее нагруженных элементах каркаса – колоннах – составляет $\max k = 0,806627$ и не превышает единицы. Как и в предыдущем случае, несущая способность элементов каркаса по первой группе предельных состояний обеспечена.

Следует отметить, что при упругой работе элементов каркаса в расчетной схеме № 1 величина коэффициента использования сечения по условию устойчивости плоской формы изгиба $\max K_{ик} = 0,97$ меньше единицы всего на 3 %, а в нелинейном расчете каркаса по теории предельных поверхностей

конструктивных элементов в расчетной схеме № 2 значение коэффициента использования по несущей способности $\max k = 0,806627$ меньше единицы уже на 19 %. Таким образом, учет упругопластической работы стали показывает фактический запас по несущей способности металлического каркаса до наступления его предельного состояния.

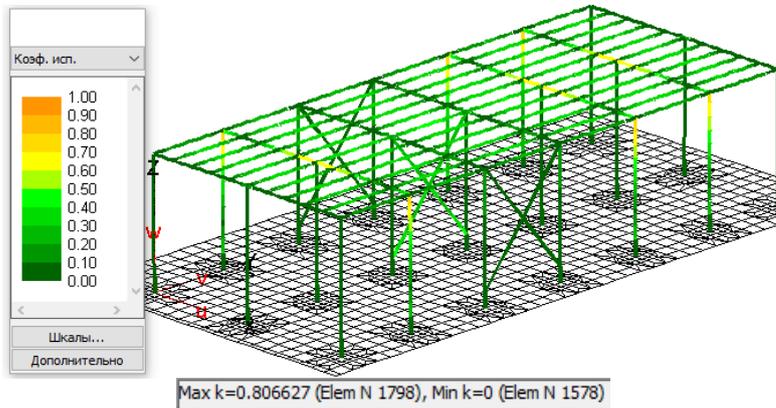


Рис. 4. Изополя коэффициента использования по несущей способности элементов металлического каркаса в расчетной схеме № 2

Fig. 4. Isofields of bearing capacity use factor of metal frame in design model 2

Расчетная схема № 3. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний показана на рис. 5. Форма колебаний соответствует крутильно-изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний коэффициент использования критической нагрузки (критический параметр) $p = 2,1888$, что превышает необходимый нормативный запас по устойчивости, равный 2. Следовательно, условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний выполнено.

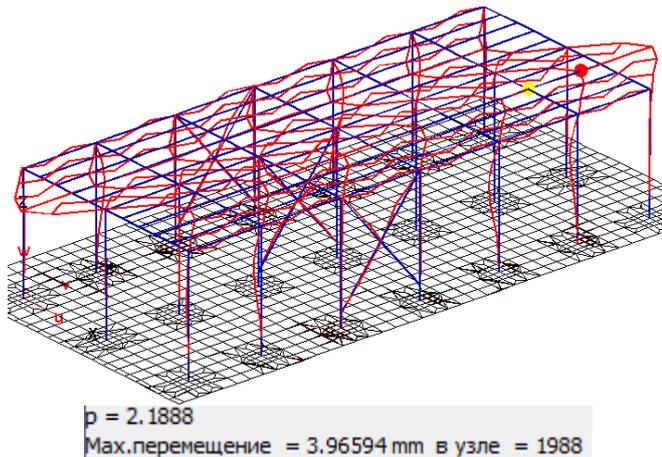


Рис. 5. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 3 ($\times 1000$)

Fig. 5. Deformation of fundamental harmonics in design model 3 (magnification: 1000 \times)

Расчетная схема № 4. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний приведена на рис. 6. Форма колебаний, как и в предыдущем случае, соответствует крутильно-изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний критический параметр $p = 1,07679$, что практически в два раза меньше необходимого двойного нормативного запаса по устойчивости, в результате чего условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний уже не выполняется.

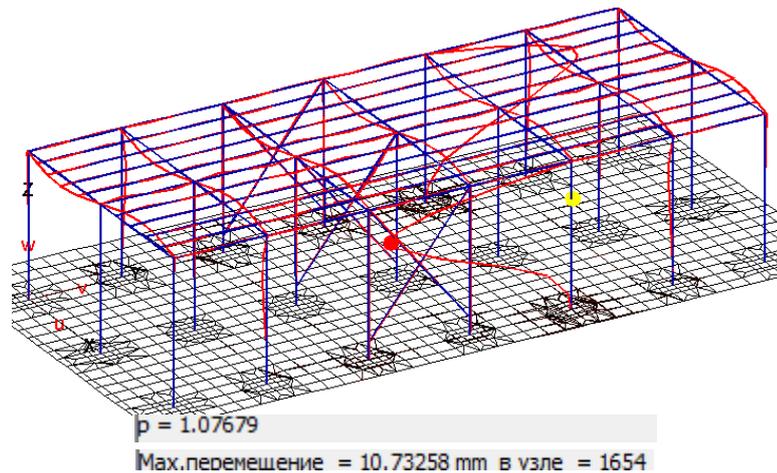


Рис. 6. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 4 ($\times 1000$)

Fig. 6. Deformation of fundamental harmonics in design model 4 (magnification: 1000 \times)

В заключение следует отметить, что в расчете металлического каркаса на действие статических нагрузок в случае допущения нелинейной работы стали по билинейной диаграмме деформирования учет физической нелинейности при расчете на устойчивость оказался определяющим результатом расчета и его невыполнение привело бы к недостоверным результатам.

Принятые проектные значения поперечных сечений элементов металлического каркаса оказались недостаточными для выполнения условий по первой группе предельных состояний. В этом случае, при заданном уровне статического нагружения металлического каркаса, основным критерием в подборе необходимых размеров поперечного сечения элементов каркаса будет являться выполнение условия устойчивости при физически нелинейной работе стали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудишин Ю.И. Металлические конструкции. Москва : Академия, 2011. 688 с.
2. Одесский П.Д. О теориях прочности и эффекте второй нагрузки применительно к стальным строительным конструкциям // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 20–24.
3. Карпенко Н.И., Колчунов В.И. О концептуально-методологических подходах к обеспечению конструктивной безопасности // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 1. С. 4–8.

4. Гуква М.И., Искендеров В.Г., Фарфель М.И. Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производственных зданий и сооружений // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 10. С. 25–28.
5. Востров В.К. Предельные состояния и вопросы прочности и конструктивной безопасности строительных металлоконструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 5. С. 20–23.
6. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 11. С. 35–41.
7. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 6 (83). С. 46–55.
8. Боровский Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 2 (85). С. 36–41.
9. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 5. С. 76–84.
10. Кудышин Ю.И. К вопросу расчета начальных несовершенств при расчете стальных стержневых систем по деформированной схеме // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 3. С. 6–9.
11. Белый Г.И. Деформационный расчет и устойчивость стержневых элементов стальных конструкций с несимметричным сечением // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 4 (87). С. 44–53.
12. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). Москва : Изд-во АСВ, 2018. 1072 с.
13. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. Вып. 12. С. 1559–1566.

REFERENCES

1. Kudishin Y.I. Metal constructions. Moscow: Academia, 2011. 688 p. (In Russian)
2. Odesskiy P.D. Strength theories and the effect of second load in relation to steel building structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2013; (10): 20–24. (In Russian)
3. Karpenko N.I., Kolchunov V.I. Conceptual-methodological approach to structural safety provision. *Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007; (1): 4–8. (In Russian)
4. Gukova M.I., Iskenderov V.G., Farfel M.I. Design, manufacture and installation errors leading to building structure emergency. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2013; (10): 25–28. (In Russian)
5. Vostrov V.K. Limit states, durability and constructive safety of steel structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2010; (5): 20–23. (In Russian)
6. Tushin A.R., Berger M.P. Strength analysis of metal truss with damaged elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2018; (11): 35–41. (In Russian)
7. Bely G.I. Reverse method of calculation of steel rod elements under load by increasing cross-sections. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020; 6 (83): 46–55. (In Russian)
8. Borovskiy D.S. Strength analysis of reinforced rod elements under multiparameter load. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
9. Semyonov D.A. Strength of reinforced concrete elements under oblique off-center compression. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; (5): 76–84. (In Russian)
10. Kudishin Yu.I. Initial imperfection analysis of steel rod systems under deformation scheme. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2011; (3): 6–9. (In Russian)
11. White G.I. Deformation and stability analysis of the steel structure elements with asymmetric cross-section. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 4 (87): 44–53. (In Russian)
12. Katyushin V.V. Buildings with steel frame frames of variable cross-section (calculation, design, construction). Moscow: ASV, 2018. 1071 p. (In Russian)
13. Perelmuter A.V. Repulsion criterion in estimating structural limit state. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (12): 559–1566. (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Author Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Статья поступила в редакцию 04.12.2023
Одобрена после рецензирования 28.12.2023
Принята к публикации 19.04.2024

Submitted for publication 04.12.2023
Approved after review 28.12.2023
Accepted for publication 19.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 143–157.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 143–157.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.131

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-143-157

EDN: HOFOEN

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ПРОВЕТРИВАЕМОМ ПОДПОЛЬЕ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

Дарья Викторовна Чуржакова, Андрей Алексеевич Филимонов

*Томский научно-исследовательский и проектный институт нефти и газа,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Одним из этапов проектирования зданий и сооружений в условиях распространения многолетнемерзлых пород является выполнение прогнозных теплотехнических расчетов для оценки изменения теплового состояния грунтов основания в период эксплуатации и выбора принципа использования многолетнемерзлых грунтов.

При проведении расчетов учитываются геологические факторы – литологическое строение, физические и теплофизические характеристики грунтов; геокриологические факторы – температуры пород, а также климатические – температура окружающей среды, скорость ветра, высота и плотность снежного покрова. Высота снежного покрова оказывает значительное влияние на естественное промерзание грунтов в зимнее время. Имеющиеся требования по очистке наметаемого снега в проветриваемом подполье часто не выполняются, что требует учета при прогнозе изменения геокриологических условий. Для зданий с проветриваемыми подпольями высота снежного покрова может изменяться в зависимости от габаритов здания, при этом принципы изменения высоты снега не нормированы. Поскольку результаты теплотехнических расчетов используются для подбора параметров свайных фундаментов и определения их несущей способности, требуется учитывать факторы, влияющие на результаты теплотехнических расчетов.

Целью исследования является определение наиболее достоверного способа задания снежного покрова в проветриваемом подполье при выполнении прогнозных теплотехнических расчетов.

В настоящей работе рассмотрены разные варианты задания снежного покрова для сооружений с проветриваемым подпольем с размерами в плане более 3 м и для вертикальных резервуаров диаметром до 25 м. Осуществлен ряд теплотехнических расчетов, проведена верификация с данными геотехнического мониторинга эксплуатируемого объекта.

Результаты. На основании выполненных расчётов определено, что высота снежного покрова влияет на результаты расчета, при использовании различных методик снеготранспорта наблюдается разница температур грунтов на одинаковых глубинах, на глубине ниже 11 м изменения температур грунтов основания для всех моделей незначительны. Определены методы задания снежного покрова, имеющие наибольшую корреляцию с реальными значениями температур в основании эксплуатируемого сооружения.

Ключевые слова: снеготранспорт, снежный покров, проветриваемое подполье, многолетнемерзлые грунты, тепловой прогноз

Для цитирования: Чуржакова Д.В., Филимонов А.А. Оценка влияния снежного покрова в проветриваемом подполье на температурный режим грунтов

основания // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 143–157. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-143-157. EDN: HOFOEN

ORIGINAL ARTICLE

**SNOWCOVER EFFECT IN OPEN CRAWL SPACE
ON TEMPERATURE CONDITIONS OF SUBGRADE SOILS****Daria V. Churzhakova, Andrey A. Filimonov***Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas, Tomsk, Russia*

Abstract. At building design stages in permafrost conditions, it is important to conduct thermal analysis to assess temperature changes in the operation of subgrade soils. In calculations, geological factors are considered, such as lithological structure, physical and thermal characteristics of soils, geocryological (rock temperature) and climatic (ambient temperature, wind speed, height and density of snowcover). The snowcover height has a significant impact on soil freezing in winter. Existing requirements are not often satisfied for clearing blown snow in the open crawl space, that requires consideration of changes in geocryological conditions. For buildings with open crawl space, the snowcover height depends on the building dimensions, however, the principles for changing the height are not standardized. Since the results of thermal engineering calculations are used to select the parameters of pile foundations and determine their load-bearing capacity, it is necessary to consider factors influencing the calculation results of thermal engineering.

Purpose: The aim of this work is to determine the most reliable way to specify snowcover in the open crawl space to predict thermal calculations.

Methodology/approach: Different snowcover types are considered for structures with the open crawl space with the plan dimensions over 3 m and for vertical tanks of a diameter 25 m. Thermotechnical calculations and verification with geotechnical monitoring data are carried out.

Research findings: It is shown that the snowcover height affects the calculation results, when using different methods of snow drifting. The temperature difference at the same depths and at depths below 11 m is insignificant for all types of subgrade soil. The definition methods are determined for the snowcover, that have the highest correlation with the real temperature of the subgrade soil.

Keywords: snow drift, snow cover, open crawl space, permafrost soil

For citation: Churzhakova D.V., Filimonov A.A. Snowcover effect in open crawl space on temperature conditions of subgrade soils. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 143–157. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-143-157. EDN: HOFOEN

Введение

Согласно регламентам технической эксплуатации зданий и сооружений, расположенных в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов, требуется удаление наметаемого снега из проветриваемого подполья. В действительности такое требование часто не соблюдается в силу территориальной удаленности объектов, нехватки кадров, высокой интенсивности выпадения осадков и по ряду иных причин. Данный факт необходимо учитывать при проектировании и закладывать наиболее неблагоприятные условия эксплуатации, т. е. невыполнение работ по удалению снега из проветриваемого подполья.

На сегодняшний день отсутствует нормативное обоснование или рекомендации к заданию снежного покрова в проветриваемом подполье для выполнения теплотехнических расчетов сооружений с подпольем. Поэтому задание расчетной модели является зоной ответственности и исследовательской работой каждого проектировщика, который подбирает параметры снежного покрова, опираясь на собственные исследования: опытные данные, проектные аналоги и другие методы, вследствие чего выявляются разночтения и несоответствия при рассмотрении результатов расчетов схожих сооружений.

Влияние параметра снежного покрова на тепловое состояние здания достаточно хорошо изучено российскими учеными [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Некорректное задание исходных данных снежного покрова, в свою очередь, может привести к искажению результатов расчетов и даже к ошибкам проектирования: различию прогнозных температур и фактических, некорректной расчетной несущей способности фундаментов и, как следствие, развитию деформаций оснований и фундаментов [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Кроме того, некорректные результаты расчетов могут стать причиной увеличения капиталоёмкости объекта строительства в виде избыточной длины или диаметра свай, установки дополнительных сезонных охлаждающих устройств (СОУ) и других мероприятий по температурной стабилизации грунтового основания. Поэтому авторы считают актуальным необходимость обоснования методов задания снежного покрова при выполнении тепловых прогнозных расчетов разного уровня сложности.

Целью исследования является подтверждение влияния снеготаноса на температурный режим грунтов основания сооружений с проветриваемым подпольем в процессе эксплуатации и обоснование наиболее достоверного способа задания снежного покрова.

Задачи исследования:

1. Рассмотреть используемые на сегодняшний день варианты задания снегового покрова в пределах проветриваемого подполья сооружений разного конструктива и назначения, при эксплуатации которых не выполняются технические регламенты, требующие осуществлять расчистку наметаемого снега в подпольях.
2. Провести расчеты разных методик задания моделей на примере одного сооружения.
3. Сравнить полученные результаты с реальным температурным распределением в основании сооружения.
4. Выделить методику корректного задания снежного покрова для выполнения прогнозных теплотехнических расчетов.

Методы исследования

Исследование было проведено в 2022–2023 гг. в АО «ТомскНИПИ-нефть». Первым этапом работы являлся сбор исходных данных:

- 1) от эксплуатирующих служб геотехнического мониторинга были предоставлены результаты замеров температур грунтов основания, высоты и плотности снежного покрова эксплуатируемых сооружений, рабочая доку-

ментация, комплекты геотехнического мониторинга и температурной стабилизации грунтов сооружений, результаты инженерных изысканий;

2) от организаций, занимающихся проектированием на многолетнемерзлых грунтах, были получены методики задания снеготаноса в моделях для выполнения теплотехнических расчетов.

В данном исследовании были рассмотрены здания и сооружения с проветриваемым подпольем из двух групп, критерием к разделению которых послужили форма в плане и габаритные размеры: здания и сооружения с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м; надземные вертикальные резервуары с проветриваемым подпольем диаметром до 25 м.

При изучении полученных данных была выявлена вариативность использования разных методик задания снежного покрова в зависимости от конструкции сооружения. По результатам анализа существующих методик было выделено 7 схем задания снеготаноса, каждая из которых предназначена для конкретных групп сооружений.

В табл. 1 представлена матрица расчетных моделей для сравнения результатов анализа методик.

Таблица 1

Матрица расчетных моделей для различных методик задания снега в проветриваемом подполье

Table 1

Calculation models for various methods of specifying snowcover in the open crawl space

Методики (схемы) задания снеготаноса		Рассматриваемые сооружения с проветриваемым подпольем	
		Сооружения с размерами в плане более 3 м	Вертикальные резервуары диаметром до 25 м
		1	2
ООО НПО «Фундаментстройаркос»			
1	Внутри подполья высота снеготаноса 0,5X м На расстоянии 2 м от периметра сооружения (за его пределами) высота снеготаноса 2X м	Расчетная модель № 1-1	Расчетная модель № 2-1
АО «ТомскНИПИнефть»			
2	Внутри подполья площадь сооружения разделяется на 3 зоны масштабированием периметра относительно центральной точки сооружения в плане на 1/3, 2/3, 3/3, с приложением снеготаноса высотой 0,5X м, 0,75X м, X м соответственно	Расчетная модель № 1-2	–

Окончание табл. 1
End of table

Методики (схемы) задания снеготаноса		Рассматриваемые сооружения с проветриваемым подпольем	
		Сооружения с размерами в плане более 3 м	Вертикальные резервуары диаметром до 25 м
		1	2
	Внутри подполья площадь сооружения радиально разделяется на 3 зоны масштабированием периметра относительно центральной точки сооружения в плане на 1/3, 2/3, 3/3, с приложением снеготаноса высотой 0,25X м, 0,5X м, 0,75X м	–	Расчетная модель № 2-2
Иные (закрытые) источники			
3	Внутри подполья высота снеготаноса 0,2X м	Расчетная модель № 1-3	Расчетная модель № 2-3
4	Внутри подполья (под сооружением) на расстоянии 1 м от периметра сооружения высота снеготаноса X м На остальной площади внутри подполья высота снеготаноса 0,2X м	Расчетная модель № 1-4	–

Примечание. X – нормативная высота снежного покрова, м (средняя декадная высота снежного покрова, принятая по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий объектов, указанная на рис. 1).

Специалисты НПО «Фундаментстройаркос» для всех сооружений с проветриваемым подпольем используют единую схему задания снеготаноса (расчетные модели № 1-1, 2-1), специалисты АО «ТомскНИПИнефть» используют разные методики задания снеготаноса для различных типов зданий и сооружений (расчетные модели № 1-2, 2-2). На основании мнений других проектирующих специалистов из разных проектных институтов были выделены еще две схемы (расчетные модели № 1-3, 2-3, 1-4).

Климатические данные и геокриологические условия местоположения исследуемых сооружений

Опытные сооружения запроектированы и построены на площадке, расположенной на территории Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа. Согласно физико-географическому районированию, район расположен на севере центральной части Западно-Сибирской низменности, в лесотундровой зональной области. В соответствии со СП 131.13330.2020, район

исследования относится к I району, 1Д подрайону климатического районирования для строительства. Из опасных гидрометеорологических явлений в районе наблюдаются снежные заносы, гололед и скорость ветра более 30 м/с.

Климатические характеристики территории строительства использованы из отчета по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий, выполненных для проектирования объекта (табл. 2).

Таблица 2

Климатические данные местоположения исследуемых сооружений

Table 2

Climatic data on the structure location

Среднемесячная температура воздуха, °С												
Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура	-26,4	-26,4	-19,2	-10,3	-2,6	8,4	15	11	5	-6,3	-18,2	-24
Среднемесячная скорость ветра, м/с												
Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Скорость ветра	3,9	3,8	3,4	4,6	5	5	4	3,8	4	4,6	4,1	3,9
Средняя декадная высота снежного покрова, см												
Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Высота снега	48 51 55	58 50 62	64 66 68	66 66 62	54 42 42	4 – –	– – –	– – –	– – –	2 8 15	16 27 32	36 40 44

Для выполнения расчетов были взяты данные из отчета по результатам инженерных изысканий, выполненных для проектирования объекта строительства.

Геокриологические условия района характеризуются залеганием древней реликтовой мерзлоты с наличием несквозных и сквозных таликов под озерами и ежегодным появлением в летнее время сезонно-талого (мерзлого) слоя. Мощность сезонно-мерзлого (талого) слоя изменяется во времени и пространстве, зависит от литологического состава грунтов, влажности, характера растительности, мощности и плотности снега и степени суровости зимы в различные годы.

Среднегодовая температура мерзлых грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд (10–12 м) составляет $-0,79$ °С, на глубине 17 м отмечается температура $-0,78$ °С.

Инженерно-геологическое строение грунтов исследуемых объектов сложено в основном твердомерзлыми песками средней крупности массивной криотекстуры и суглинком пластичномерзлым слоистой криотекстуры.

Сооружения с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м

Исследуемым сооружением с габаритными размерами более 3 м была выбрана станция насосная производственно-противопожарного водоснабжения длиной 35 м, шириной 15 м и высотой подполья 1,8 м (рис. 1).

Для данного сооружения, в соответствии с матрицей расчетных моделей, были разработаны 4 идентичные расчетные модели с различными схемами снегозанося в подполье (рис. 2).

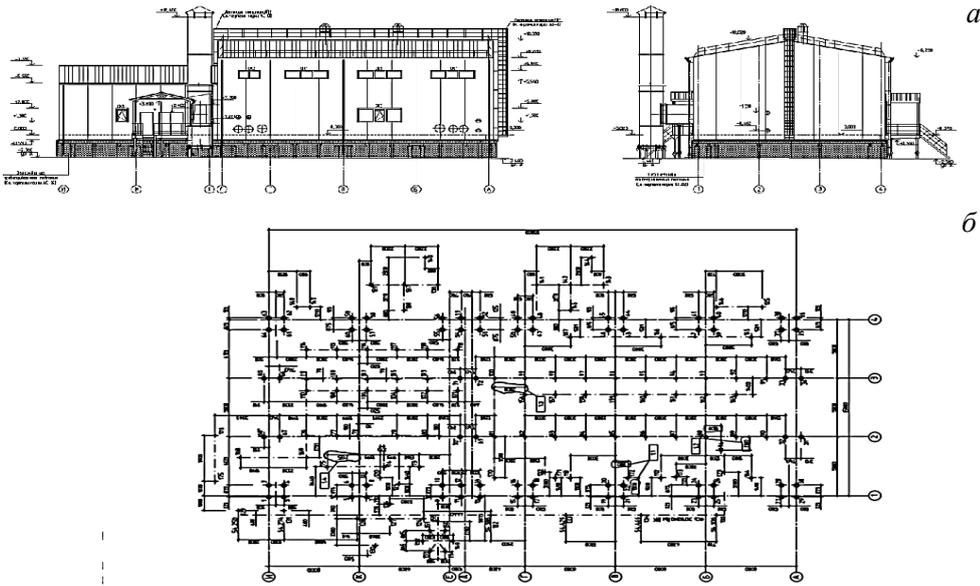


Рис. 1. Исследуемое сооружение насосной станции:
 а – виды сооружений; б – схемы расположения свайных оснований
 Fig. 1. Pumping station structures:
 а – types; б – arrangement of pile foundations

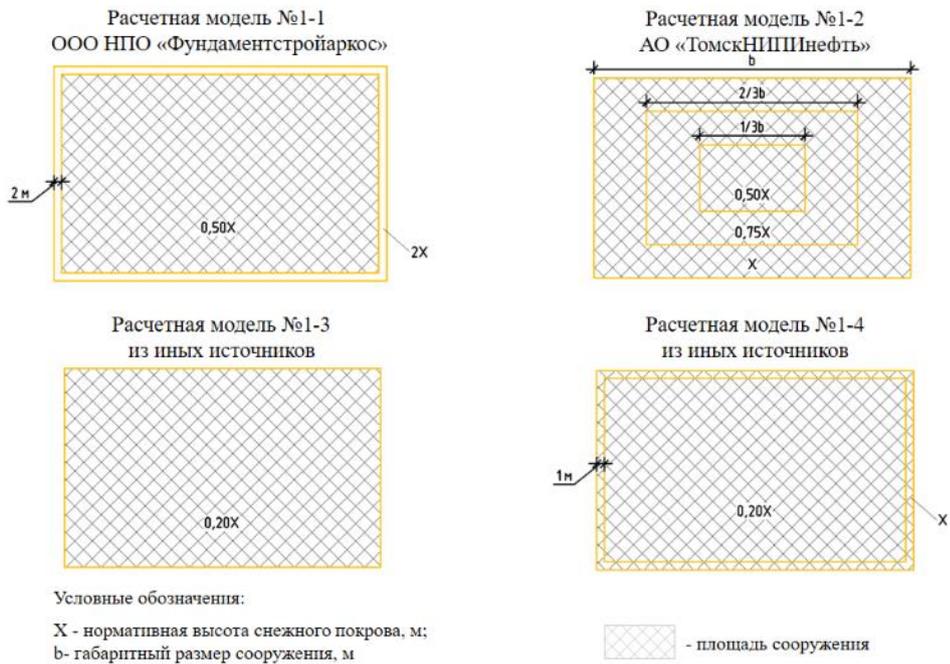


Рис. 2. Визуальное отображение снегозанаос под зданием по данным различных проектирующих организаций
 Fig. 2. Schematic of snow drift under building according to data from various design organizations

Наземные вертикальные резервуары диаметром до 25 м с проветриваемым подпольем

Исследуемым сооружением из группы надземных вертикальных резервуаров с проветриваемым подпольем был выбран резервуар производственно-противопожарного запаса воды диаметром в плане 15,18 м и высотой проветриваемого подполья 1,2 м (рис. 3).

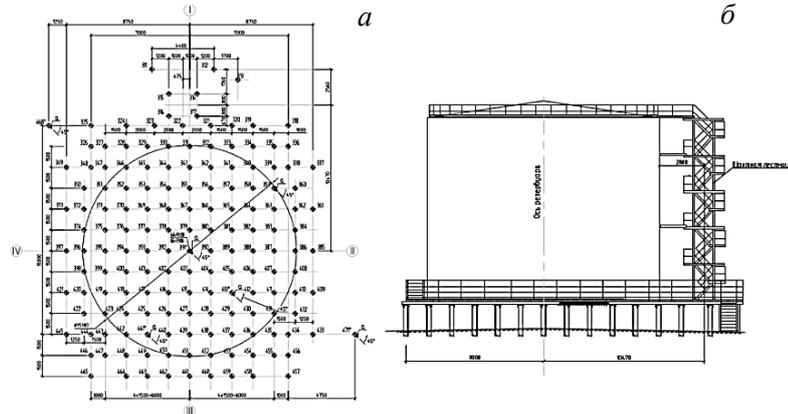


Рис. 3. Исследуемое сооружение надземного вертикального резервуара:
 а – схемы расположения свайных оснований; б – вид сооружения
 Fig. 3. Above-ground upright tank:
 а – arrangement of pile foundations; б – type

Для надземного резервуара, в соответствии с матрицей расчетных моделей, были разработаны 3 расчетные модели со схемами снеготаноса в подполье (рис. 4).

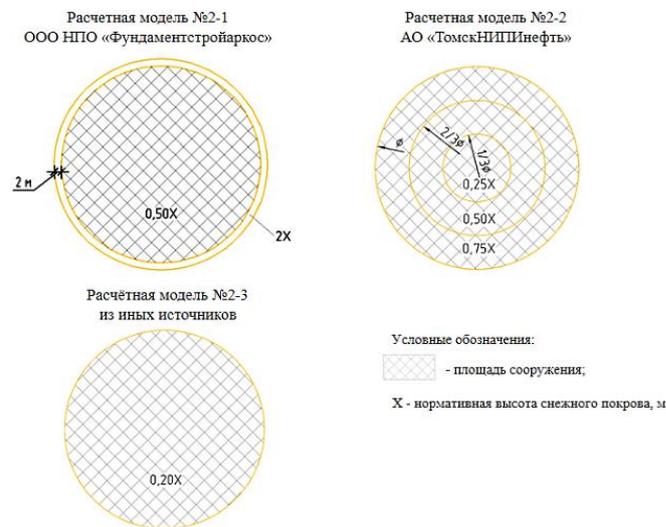


Рис. 4. Визуальное отображение снеготаноса под зданием по данным различных проектирующих организаций
 Fig. 4. Schematic of snow drift under building according to data from various design organizations

Разработка расчетной модели

Для выполнения расчетов в программном комплексе теплового моделирования были разработаны модели, каждая из которых учитывала климатические характеристики территории расположения исследуемого сооружения, физико-механические характеристики и температурное распределение грунтов основания, тренд глобального потепления, конструктивные особенности сооружения и перекрытия, влияние от теплового режима внутри помещения, а также наличие снежного покрова в соответствии со сменой сезонов и его распределение в проветриваемом подполье согласно предложенным схемам (рис. 2 и 4).

Использование СОУ не предусмотрено проектом, поэтому в расчетных моделях также не учитывается.

Теплотехнические расчеты выполнялись в специализированном программном комплексе Frost 3D.

Результаты расчета сооружений с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м

Схемы задания снегозаноса являлись единственным различием между расчетными моделями № 1-1, № 1-2, № 1-3, № 1-4. Результаты были получены из одинаковых точек в пространстве модели (точка в углу здания, имеющая координаты 15,3 м по оси абсцисс и 5,38 м по оси ординат; начало осей координат совпадает с геометрическим центром сооружения в плане).

При анализе результатов расчетов было определено, что наибольшие изменения будут наблюдаться в последний год эксплуатации ввиду накопительного эффекта. Полученные значения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты прогнозного теплотехнического расчета сооружений с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м на 15.09.2045 г.

Table 3

Thermotechnical calculations for building with open crawl space with plan dimensions over 3 m for September 15, 2045

Модель	Глубина замера, м														T _е , °С
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Расчетные температуры грунтов основания, °С														
№ 1-1	6,1	4,2	0,9	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
№ 1-2	6,2	5	2,6	0,6	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,3
№ 1-3	6,1	3,8	-0,2	-1,2	-1,6	-1,6	-1,4	-1,2	-1,1	-1,0	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8	-1,3
№ 1-4	6,1	3,8	-0,1	-0,9	-1,1	-1,1	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,9

Примечания:

1. T_е – эквивалентная температура по боковой поверхности сваи, °С.
2. Модель – модель задания снегозаноса для расчета сооружений с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м.

3. Высота снега в точке съема результатов:

- 50 % от нормативного значения для расчетной модели № 1-1;
- 100 % от нормативного значения для расчетной модели № 1-2;
- 20 % от нормативного значения для расчетной модели № 1-3;
- 20 % от нормативного значения для расчетной модели № 1-4.

По результатам расчетных моделей № 1-1, № 1-2, № 1-3, № 1-4 установлено, что в пределах боковой поверхности сваи, от подошвы деятельного слоя до острия (на глубине от 3 до 11 м) наблюдается разница температур на одинаковой глубине от 0,6 до 1,8 °С. Ниже 11 м результаты близки по значению друг к другу.

На основании результатов расчетных моделей № 1-2, № 1-3 было определено, что высота снежного покрова напрямую влияет на температуру грунтового основания. Так, при сокращении высоты снежного покрова на 80 % эквивалентная температура по боковой поверхности понижается на 1 °С, или на 77 %.

Кроме того, была выявлена закономерность изменения результатов расчета при появлении «смежной» зоны снегозаноса с повышенной высотой. Таким образом, результаты расчетов моделей № 1-3, № 1-4 различаются при идентичной высоте снегозаноса в пределах точки съема данных. «Смежная» зона с повышенным снегозаносом в расчетной модели № 1-4 увеличивает эквивалентную температуру на 0,4 °С, или 31 %.

Результаты расчета вертикальных резервуаров

Схемы задания снегозаноса являлись единственным различием между расчетными моделями № 2-1, № 2-2, № 2-3. Результаты расчетов определялись в двух одинаковых точках пространства модели: в центре сооружения и на периферии.

Аналогично исследованию сооружений с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м при расчете вертикальных резервуаров также было выявлено, что наибольшие изменения будут наблюдаться в последний год эксплуатации. Полученные значения представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты прогнозного теплотехнического расчета вертикального резервуара на 15.09.2045 г.

Table 4

Thermotechnical calculations for vertical tank for September 15, 2045

Мо- дель	Глубина замера, м														T _г , °С
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Расчетные температуры грунтов основания, °С														
	Центр сооружения														
№ 2-1	6,1	3,9	-0,1	-0,8	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,7
№ 2-2	6,1	3,9	-0,1	-0,9	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,8
№ 2-3	6,1	3,8	-0,2	-1,5	-2,1	-2,1	-1,9	-1,6	-1,3	-1,2	-1,0	-0,9	-0,8	-0,8	-1,7

Окончание табл. 4
End of table

Мо- дель	Глубина замера, м														T_e , °С
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
	Расчетные температуры грунтов основания, °С														
	Периферия сооружения														
№ 2-1	6,1	4,0	0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
№ 2-2	6,1	3,9	-0,1	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
№ 2-3	6,1	3,8	-0,2	-1,2	-1,6	-1,6	-1,4	-1,2	-1,0	-0,9	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7	-1,3

Примечания:

1. T_e – эквивалентная температура по боковой поверхности сваи, °С.
2. Модель – модель задания снеготранспорта для расчета надземных вертикальных резервуаров диаметром до 25 м.
3. Высота снега в точке съема результатов (центр сооружения):
 - 50 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-1;
 - 25 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-2;
 - 50 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-3.
4. Высота снега в точке съема результатов (периферия сооружения):
 - 50 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-1;
 - 75 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-2;
 - 20 % от нормативного значения для расчетной модели № 2-3.

На основании результатов расчета модели № 2-3 было определено, что при равномерном задании снеготранспорта под всем резервуаром температуры основания в центре здания и на периферии различаются. Грунты под центральной частью резервуара имеют эквивалентную температуру на 0,4 °С (или на 24 %) ниже.

Средняя температура по боковой поверхности сваи расчетной модели № 2-1 выше аналогичного значения для расчетной модели № 2-3. При этом высота снеготранспорта в модели № 2-1 задана выше на 30 %, чем в модели № 2-3. Таким образом, чем больше высота снежного покрова, тем выше эквивалентная температура. Кроме того, было определено, что процентные соотношения T_e для моделей № 2-1 и № 2-3 в центре и на периферии не соответствуют друг другу (41 и 38 % соответственно).

Из результатов по расчетным моделям № 2-1, № 2-2, № 2-3 также установлено, что разница эквивалентных температур на одинаковых глубинах составляет от 0,5 до 1,2 °С.

Верификация расчетных моделей

Для верификации и выбора наиболее реалистичных расчетных моделей задания снежного покрова было выполнено сравнение результатов прогнозных температурных полей и данных фактических температурных наблюдений на исследуемых объектах (табл. 5).

Средняя температура результатов расчетов моделей № 1-3, № 1-4, № 2-3 на протяжении эксплуатации понижается, что не соответствует естественному протеканию физических процессов, поскольку под влиянием тренда глобаль-

ного потепления, теплового излучения от сооружения, отсутствия сезонно-действующих охлаждающих устройств и специфичности климатической зоны исключено промораживание грунтового основания. Это подтверждается результатами натуральных наблюдений, анализ которых показал, что средняя температура по боковой поверхности сваи от подошвы деятельного слоя до острия не изменяется или изменяется незначительно.

Таблица 5

Эквивалентные температуры (T_e) грунтов основания, °С

Table 5

Equivalent temperature of subgrade soils

Модель задания снеготаноса	Результаты измерений, °С				
	15.02.2020	09.02.2021	25.01.2022	15.09.2030	15.09.2045
Сооружения с проветриваемым подпольем с габаритными размерами в плане более 3 м					
Расчетная модель № 1-1	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,5
Расчетная модель № 1-2	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2
Расчетная модель № 1-3	-0,4	-0,5	-0,6	-1,2	-1,3
Расчетная модель № 1-4	-0,4	-0,4	-0,5	-0,8	-1,0
Натурные измерения	-0,5	-0,5	-0,5	–	–
Надземные вертикальные резервуары диаметром до 25 м					
Центр сооружения					
Расчетная модель № 2-1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,9	-0,7
Расчетная модель № 2-2	-0,4	-0,4	-0,5	-0,9	-0,8
Расчетная модель № 2-3	-0,4	-0,5	-0,6	-1,8	-1,7
Натурные измерения	-0,4	-0,4	-0,5	–	–
Периферия сооружения					
Расчетная модель № 2-1	-0,4	-0,4	-0,5	-0,6	-0,5
Расчетная модель № 2-2	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5
Расчетная модель № 2-3	-0,4	-0,6	-0,6	-1,4	-1,3
Натурные измерения	-0,5	-0,5	-0,5	–	–

В результатах расчетов моделей № 1-1, № 1-2, № 2-1, № 2-2 сохраняется тенденция к повышению температур, не наблюдается резкое и аномальное изменение температур, прогнозы совпадают с данными натуральных измерений. Схемы задания снеготаноса, принятые в данных моделях, являются наиболее реалистичными.

Заключение

Выполненное исследование позволило рассмотреть и исключить нерелистичные методики задания снежного покрова и сузить вариативность применяемых способов задания снежного покрова в проветриваемом подполье. Используемые АО «ТомскНИПИнефть» модели задания снежного покрова (№ 1-2, № 2-2) не приводят к неестественному изменению температур грунтов основания, результаты прогнозных расчетов верифицированы при сравнении данных натурных наблюдений и будут применяться при дальнейшем проектировании.

По результатам исследования можно заключить, что высота снежного покрова в проветриваемом подполье напрямую влияет на результаты расчета. Применение некорректных методик может привести к несоответствию расчетного и фактического значений несущей способности свай, заложению недостаточных решений для обеспечения устойчивого состояния фундаментов, что, в свою очередь, приведет к деформациям, авариям и необходимости дорогостоящей реконструкции фундаментов. Таким образом, выявлена необходимость нормирования данного актуального вопроса для исключения возможности проведения некорректных расчетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Константинов П.Я.* Влияние почвенной влажности и снежного покрова на тепловое состояние многолетнемерзлых грунтов Центральной Якутии // Географические исследования Якутии: история, современность и перспективы : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня создания Якутского отдела Императорского Русского географического общества, Якутск, 21–23 августа 2013 г. Якутск : ООО «Издательство Сфера», 2014. С. 190–194. EDN: TJIBHX
2. *Веде П.Ю., Жжонных А.М., Пахомов П.С.* Исследование теплового сопротивления снегового покрова для прогнозирования растепления многолетнемерзлых грунтов // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19–21 октября 2022 г. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. С. 473–476. EDN: AJZFMG
3. *Шерстюков А.Б., Анисимов О.А.* Оценка влияния снежного покрова на температуру поверхности почвы по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 17–25. EDN: NRINXZ
4. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А.* Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 3. С. 60–68. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68). EDN: YPTNAJ
5. *Шерстюков А.Б.* Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 1. С. 79–87. EDN: ILKVVN
6. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В.* Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лёд и снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 93–103. EDN: OMCURG
7. *Никишин А.В., Набоков А.В., Огороднова Ю.В., Коркишко О.А.* Применение различных видов систем температурной стабилизации на объектах нефтегазовой отрасли // Инженерный вестник Дона. 2017. № 2 (45). С. 136. EDN: ZEOOHF
8. *Корнилов Т.А., Алексеев Н.Н.* Архитектурно-конструктивные приемы в проектировании энергоэффективных арктических поселений // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 3. С. 54–63. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-54-63. EDN: HNNBQR

9. Ухова Ю.А. Анализ структуры техногенных воздействий на температуру многолетнемерзлых грунтов в Норильском промышленном районе // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии : материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 20–21 марта 2008 г. / отв. ред. В.И. Осипов. Вып. 10. Москва : ГЕОС, 2008. С. 265–270. EDN: VJTFBJ
10. Романцов Р.В., Краснобаев И.В. Повышение эксплуатационной пригодности концепции крытых поселений с искусственным микроклиматом к сложным геокриологическим условиям Заполярья // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 1 (39). С. 73–81. EDN: YIOAQR
11. Омельченко О.М. Оценка необходимости восстановления работоспособности термостабилизаторов в основании сооружений // Избранные доклады 66-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 21–25 сентября 2020 г. Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 103–107. EDN: RNWLCR
12. Калинин К.А. Особенности конструктивных решений зданий для северной строительноклиматической зоны // Сборник статей LXIII Международной научной конференции «Техноконгресс», Кемерово, 12 апреля 2021 г. Кемерово : Издательский дом «Плутон», 2021. С. 16–18. EDN: DNBVHE
13. Примаков С.С., Пульдас Л.А., Забора И.В. Расчет теплового взаимодействия различных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 2. С. 43–58. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58. EDN: XCBEVL
14. Кутлыева З.Р., Закирова Э.А., Гаррис Н.А. Особенности тепловых расчетов при эксплуатации резервуаров на вечномерзлых грунтах // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : сборник тезисов VIII Международной научно-технической конференции, Новополюк, 25–28 ноября 2014 г. / УО «Полоцкий государственный университет» ; под общ. ред. В.К. Липского. Новополюк : Полоцкий государственный университет, 2014. С. 71–73. EDN: WYTSVP
15. Назиров Р.А., Жжонных А.М., Веде П.Ю., Андюсева А.Г. Теплотехнический расчет свайного фундамента на вечномерзлых грунтах // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 г. / отв. за вып. Д.В. Платонов. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. С. 124–125. EDN: SQXNWZ

REFERENCES

1. Konstantinov P.Y. The influence of soil moisture and snow cover on the thermal state of permafrost soils in Central Yakutia. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'Geographical Studies of Yakutia: History, Modernity and Prospects'*. Yakutsk: "Sfera", 2014. Pp. 190–194. EDN: TJJBHX (In Russian)
2. Vede P.Y., Zhzhonykh A.M., Pakhomov P.S. Thermal resistance of snowcover to predict permafrost soil thawing. In: *Proc. All-Russ. Sci. Conf. devoted to the 40th anniversary of the Krasnoyarsk Civil Engineering Institute*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022. Pp. 473–476. EDN: AJZFMG (In Russian)
3. Sherstyukov A.B., Anisimov O.A. The snowcover effect on soil surface temperature based on observational data. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2018; (2): 17–25. EDN: NRINXZ (In Russian)
4. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Chernov R.A. Thermal conductivity of snow and its variability. *Kriosfera Zemli*. 2017; 21 (3): 60–68. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68). EDN: YPTHAJ (In Russian)
5. Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow depth in Russia. *Kriosfera Zemli*. 2008; 12 (1): 79–87. EDN: ILKVVN (In Russian)
6. Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Thermal resistance of snowcover and its influence on soil freezing. *Led i sneg*. 2013; 53, (1): 93–103. EDN: OMCRUG (In Russian)
7. Nikishin A.V., Nabokov A.V., Ogorodnova Yu.V., Korkishko O.A. Application of various types of temperature stabilization systems to oil and gas industry facilities. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2017; 2 (45): 136. EDN: ZEOOHF (In Russian)

8. Kornilov T.A., Alekseev N.N. Architectural and constructive techniques in design of energy-efficient Arctic settlements. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2023; (3): 54–63. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-54-63. EDN: HNNBQR (In Russian)
9. Ukhova Yu.A. Structural analysis of technogenic impacts on permafrost soil temperature in the Norilsk industrial region. In: *Annual Session of the RAS Scientific Council on Geoecology, Geotechnology and Hydrogeology in Memory of Sergeev 'Sergeev Readings'*. V.I. Osipov, Ed., vol. 10. Moscow: GEOS, 2008. Pp. 265–270. EDN: VJTFBJ (In Russian)
10. Romantsov R.V., Krasnobaev I.V. Suitability of covered settlement with artificial microclimate to complex geocryological conditions of the Arctic. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2017; 1 (39): 73–81. EDN: YIOAQR (In Russian)
11. Omelchenko O.M. Assessing the need to restore the performance of thermal stabilizers in the base structures. In: *Proc. 66th Sci. Conf. of Students and Young Scientists*, Tomsk, September 21–25, 2020. Pp. 103–107. EDN: RNWLCR (In Russian)
12. Kalinin K.A. Features of structural solutions of buildings for the northern construction-climatic zone. In: *Proc. 63rd Int. Sci. Conf. 'Technocongress'*, Kemerovo, April 12, 2021. Kemerovo: "Pluto", 2021. Pp. 16–18. EDN: DNBVHE (In Russian)
13. Primakov S.S., Poldas L.A., Zabora I.V. Calculation of thermal interaction of various structures with permafrost foundation soils. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*. 2019; 5 (2): 43–58. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-43-58. EDN: XCBEBL (In Russian)
14. Kutlyeva Z.R., Zakirova E.A., Garris N.A. Thermal calculations during reservoir operation in permafrost soils. In: *Proc. 8th Int. Sci. Conf. 'Reliability and Safety of Main Pipeline Transport'*, V.K. Lipsky, Ed. Novopolotsk, 2014. Pp. 71–73. EDN: WYTSVP (In Russian)
15. Nazirov R.A., Zhzhonykh A.M., Vede P.Yu., Andyuseva A.G. Thermal engineering analysis of pile foundation on permafrost soils. In: *Proc. 1st All-Russ. Sci. Conf. 'Yenisei Thermophysics'*, Krasnoyarsk, March 28–31, 2023. Pp. 124–125. EDN: SQXNWZ (In Russian)

Сведения об авторах

Чуржакова Дарья Викторовна, инженер I категории, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, churzakovadv@tomsknipi.ru

Филимонов Андрей Алексеевич, гл. специалист, АО «ТомскНИПИнефть», 634027, г. Томск, пр. Мира, 72, filimonovaa@tomsknipi.ru

Authors details

Daria V. Churzhakova, First Rank Engineer, Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas, 72, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, churzakovadv@tomsknipi.ru

Andrey A. Filimonov, Chief Specialist, Tomsk Research and Design Institute of Oil and Gas, 72, Mira Ave., 634027, Tomsk, Russia, filimonovaa@tomsknipi.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.11.2023
Одобрена после рецензирования 02.02.2024
Принята к публикации 25.03.2024

Submitted for publication 14.11.2023
Approved after review 02.02.2024
Accepted for publication 25.03.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 158–169.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 158–169.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 531.31;539.3

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-158-169

EDN: FGMWEZ

ПОСТОЯННЫЕ УПРУГОСТИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ

**Анай-Хаак Бугалдаевна Калдар-оол, Руслан Николаевич Сандан,
Алдын-Херел Хеймерович Монгуш**

Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

Аннотация. Исследуются новые анизотропные материалы с цилиндрической анизотропией, включая армированные различными волокнами намоточные композиционные материалы. Для создания математических моделей, объясняющих изменение модуля упругости, применено алгебраическое решение дифференциального уравнения четвертого порядка в частных производных с двумя переменными в полярных координатах.

Актуальность изучения анизотропных материалов обусловлена их уникальными свойствами, которые могут быть оптимизированы для конкретного применения.

Цель исследования заключается в изучении свойств анизотропии композиционных материалов с цилиндрической анизотропией.

Научная новизна. В результате вычисления получены соотношения между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии – параметры упругости. В определении свойств композиционных материалов с плоской схемой анизотропии постоянные упругости для цилиндрически анизотропных тел в главных направлениях анизотропии являются инновационным шагом, который позволяет достаточно просто и эффективно определять параметры упругости и прочность материалов при произвольном направлении координатных осей. Одно из полученных соотношений между постоянными упругости в главных направлениях анизотропии выведено впервые, а второе вытекает из решения задачи анизотропии криволинейного ортотропного тела С.Г. Лехницким.

Методы исследования. Уравнения переведены в декартовы координаты и использованы функции напряжений в виде суммы полиномов.

Результаты исследований могут найти применение при совершенствовании высокопрочных композиционных материалов, при разработке новых технологий проектирования и изготовления строительных конструкций, высокопрочных конструкций из синтетических композиционных материалов.

Ключевые слова: анизотропия, композиционные материалы, математическая модель, цилиндрически анизотропное тело, модуль упругости, главные напряжения

Для цитирования: Калдар-оол А.-Х.Б., Сандан Р.Н., Монгуш А.-Х.Х. Постоянные упругости анизотропного материала с цилиндрической анизотропией // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 158–169. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-158-169. EDN: FGMWEZ

ORIGINAL ARTICLE

ELASTIC CONSTANTS OF CYLINDRICALLY ANISOTROPIC MATERIAL

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, Ruslan N. Sandan, Aldyn-Kherel H. Mongush
Tuvan State University, Kyzyl, Russia

Abstract. This article examines new cylindrically anisotropic materials, including winding composite materials reinforced with various fiber, and a mathematical solution of the fourth-order partial differential equation with two variables in polar coordinates.

Purpose: The aim of this work is to study anisotropy properties of composite materials with cylindrical anisotropy.

Methodology/approach: For a solution, equations are translated into Cartesian coordinates, and stress functions are used as a sum of polynomials. As a result of the solution, two relations are obtained between the elastic constants in the main direction of anisotropy, i.e., elasticity parameters. These parameters are important to determine the mechanical properties of anisotropic material.

Research findings: New high-strength composite materials are improved to apply in new technologies for building design and construction, high-strength structures are obtained using synthetic composite materials.

Originality/value: Elastic constants for cylindrically anisotropic materials represent an innovative approach to determine the properties of composite materials with a flat anisotropy scheme, which make it easier and more efficient to determine elasticity parameters and strength in an arbitrary direction of coordinate axes.

Keywords: anisotropy, composite materials, mathematical model, cylindrically anisotropic material, modulus of elasticity, main stress

For citation: Kaldar-ool A.-Kh.B., Sandan R.N., Mongush A.-Kh.Kh. Elastic constants of cylindrically anisotropic material. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 158–169. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-158-169. EDN: FGMWEZ

К анизотропным материалам с цилиндрической анизотропией можно отнести намоточные композиционные материалы, армированные волокнами углерода, бора, базальта, металлическими нитями, стекловолокнами, и древесину, как природный композиционный материал [1, 2].

В природе композиционные материалы формируются естественным путем, наиболее прочные волокна, придающие высокую прочность, ориентированы согласно основным принципам бионики по направлению с главными напряжениями и деформациями.

Изучение природных композиционных материалов позволяет материаловедам создавать новые с заранее заданными свойствами.

Широкое распространение получают изделия, изготовленные из стеклопластиков, в том числе намоточных, напоминающих природный композит – древесину – с ее годичными слоями. Часто древесину, костные волокна животных и человека принимают за прототип при создании новых современных высокопрочных материалов [3].

По строению такие материалы являются анизотропными, т. е. меняющими физические и механические свойства по объему и направлениям в зависимости от желаемых характеристик.

Понимание и контроль анизотропии в материалах позволяют создавать новые материалы с улучшенными характеристиками и функциональностью. Например, анизотропные материалы могут обладать улучшенной прочностью, жёсткостью, теплопроводностью или электропроводностью в определенных направлениях, что делает их ценными для различного технологического применения и в инженерии.

Исследованием анизотропии упругости и прочности анизотропных материалов занимались многие отечественные ученые: Е.К. Ашкенази, Ю.С. Соболев, А.Н. Митинский, С.Г. Лехницкий, А.А. Поздняков, А.И. Кузнецов, А.Л. Рабинович и др., а также зарубежные: Н. Kubler, D.V. Rosato, A. Jlinen, C.S. Grove, R. Keylwerth и др.

Анализ литературных источников показал, что в главных направлениях анизотропии до недавнего времени отсутствовала выявленная математическая взаимосвязь между постоянными упругости [4, 5], как в изотропии тел. Е.К. Ашкенази, Ю.С. Соболев и некоторые другие авторы отмечают, что это является одной из главных причин получения противоречивых результатов экспериментальных и теоретических исследований. Это послужило толчком для проведения новых исследований упругости и прочности анизотропных материалов, в особенности композиционных синтетического и природного происхождения.

В последние 15–20 лет были получены новые интересные данные для анизотропных материалов, хотя в исследованиях и практических задачах до сих пор нередко используются результаты 50–70-летней давности.

В настоящей статье приводятся результаты [6, 7] теоретических исследований анизотропии упругости намоточных композиционных материалов, основанные на известных законах математики и механики, проводится их сопоставление с результатами более ранних исследований С.Г. Лехницкого, Е.К. Ашкенази, Ю.С. Соболева и др.

Целью исследования является изучение свойств анизотропии композиционных материалов с цилиндрической анизотропией и их влияния на физико-механические характеристики.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Определение модуля упругости и показателя анизотропии в зависимости от главных направлений анизотропии.
2. Определение параметров упругости композиционных материалов, обеспечивающих постоянные упругие свойства материала конструкции.
3. Решение задачи изгиба криволинейного ортотропного бруса с цилиндрической анизотропией.

За основу в теоретических исследованиях было принято известное в теории упругости анизотропного тела [4, 5] однородное дифференциальное уравнение в полярных координатах четвертого порядка в частных производных для ортотропного тела [5, 8, 9, 10]:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{E_t} \frac{\partial^4 F}{\partial r^4} + \left(\frac{1}{G_{rt}} - 2 \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^4 F}{\partial r^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{E_r} \frac{1}{r^4} \frac{\partial^4 F}{\partial \theta^4} + \frac{2}{E_t} \frac{1}{r} \frac{\partial^3 F}{\partial r \partial \theta^3} - \left(\frac{1}{G_{rt}} - 2 \frac{\mu_{rt}}{E_r} \right) \times \\ & \times \frac{1}{r^3} \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial \theta^2} - \frac{1}{E_r} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \left(2 \frac{1 - \mu_{rt}}{E_r} + \frac{1}{G_{rt}} \right) \frac{1}{r^4} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} + \frac{1}{E_r} \frac{1}{r^3} \frac{\partial F}{\partial r} = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

где E_r, E_t – модули упругости при растяжении (сжатии) в главных направлениях; μ_{rt}, G_{rt} – коэффициент Пуассона и модуль упругости при сдвиге.

Для решения задачи уравнение (1) было переведено в декартовы координаты.

При решении уравнения (1) в плоской задаче для круглой пластинки с цилиндрической анизотропией функция напряжений была принята в виде суммы полиномов [11]:

$$F = \sum_{i=1}^n x^k \cdot f_k(y), \quad (2)$$

где $f_k(y)$ – неизвестные функции, удовлетворяющие дифференциальному уравнению (1).

В результате решения уравнения (1) с подстановкой соответствующих производных от функции напряжений (2) после преобразований было получено алгебраическое уравнение (3) 2-го порядка, корни которого соответственно равны:

$$B^2 - \frac{2}{3}(5 + k^2)B - \frac{5}{3}k^4 + \frac{14}{3}k^2 + 1 = 0; \quad (3)$$

$$B_{(1)} = 3 - k^2; \quad (4)$$

$$B_{(2)} = \frac{1 + 5k^2}{3}, \quad (5)$$

где $k^2 = E_t/E_r$.

Один из корней (4) встречается в монографии С.Г. Лехницкого [9] в решении задачи изгиба кривого криволинейно-анизотропного бруса (ортотропного бруса с цилиндрической анизотропией), где в формуле (24.7) на с. 98 [9, 12]:

$$\frac{E_t}{E_r}(1 - 2\mu_{rt}) + \frac{E_t}{G_{rt}} = 3, \quad (6)$$

тогда $\beta = 2$ и распределение напряжений будет в точности таким же, как в изотропном брус.

Если для β подкоренное выражение $\beta = \sqrt{1 + \frac{E_t}{E_r}(1 - 2\mu_{rt}) + \frac{E_t}{G_{rt}}}$ преобразовать, то получим из решения [9] тот же корень из формулы (4), т. е.: $\frac{E_t}{E_r} - 2\mu_{rt} \frac{E_t}{E_r} + \frac{E_t}{G_{rt}} = 3$ или при $\frac{E_t}{E_r} = k^2$ получим $k^2 - 2\mu_{rt} \cdot k^2 = 3 - k^2$, что и было нами получено ранее (см. формулу выше) $B_{(1)} = 3 - k^2$ (4) в теоретических исследованиях [1, 12].

Или эта же формула [12]:

$$\beta = \sqrt{1 + k^2 + \frac{1 + 5k^2}{3}} = \frac{2\sqrt{1 + 2k^2}}{\sqrt{3}},$$

при $k^2 = 1$ получим то же: $\beta = \frac{2\sqrt{1 + 2k^2}}{\sqrt{3}}$ [12].

Для первой группы материалов, удовлетворяющих условию (4), изменение модуля упругости от 0 до 90° (от радиального к тангенциальному направлению) происходит через промежуточную экстремальную точку при наклоне слоев под углом 30° к линии действия силы [6].

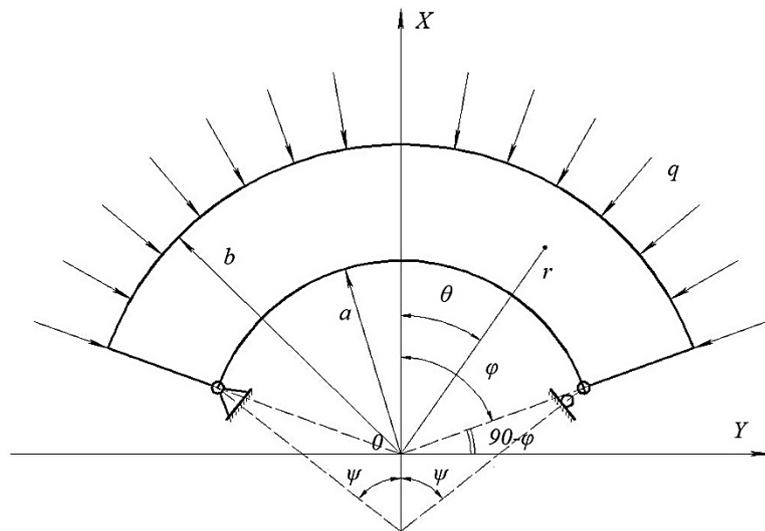
Для второй группы промежуточная точка экстремума отсутствует, и модуль упругости от 0 до 90° изменяется плавно.

К такому выводу можно прийти, анализируя полученные формулы для постоянных упругости:

$$\begin{aligned}\frac{1}{E_{x'}} &= \frac{\cos^4\theta}{E_r} + \frac{\sin^4\theta}{E_t} + \frac{3-k^2}{E_t} \cos^2\theta \sin^2\theta; \\ \frac{1}{E_{y'}} &= \frac{\sin^4\theta}{E_r} + \frac{\cos^4\theta}{E_t} + \frac{3-k^2}{E_t} \sin^2\theta \cos^2\theta; \\ \frac{1}{G_{x'y'}} &= \frac{8(k^2-1)}{E_t} \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{1}{G_{rt}}; \\ \mu_{x'y'} &= -E_{x'} \left[\frac{2(k^2-1)}{E_r} \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\mu_{rt}}{E_t} \right].\end{aligned}$$

При этом коэффициент β в соответствии с нашим решением независимо от $k^2 = E_t/E_r$, как и в работах [9, 12], будет равен 2, т. е. будет в точности таким же, каким в изотропном брус (рисунок), и это не противоречит выводу С.Г. Лехницкого:

$$\beta = \sqrt{1 + \frac{a_{11} + 2a_{12} + 2a_{66}}{a_{22}}} = \sqrt{1 + \frac{E_t}{E_r} (1 - 2\mu_{rt}) + \frac{E_t}{G_{rt}}}.$$



Криволинейный ортотропный анизотропный брус с цилиндрической анизотропией
Curvilinear orthotropic anisotropic beam with cylindrical anisotropy

Тогда напряжения в криволинейном ортотропном цилиндрически анизотропном стержне могут быть вычислены по формулам в обозначениях С.Г. Лехницкого [9, 12]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{q}{b} \left[P + Q \left(\frac{r}{r_i} \right)^{k-1} + R \left(\frac{r_i}{r} \right)^{k+1} \right] + \\ &+ \frac{q}{r_i \cdot b \cdot g_1} \frac{r_i}{r} \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^\beta + c^\beta \left(\frac{r_i}{r} \right)^\beta - (1+c^\beta) \right] \frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \psi} \cos \theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{q}{b} \left[P + Q \cdot k \left(\frac{r}{r_i} \right)^{k-1} + R \cdot k \left(\frac{r_i}{r} \right)^{k+1} \right] + \\ &+ \frac{q}{r_i \cdot b \cdot g_1} \frac{r_i}{r} \left[(1+\beta_1) \left(\frac{r}{r_i} \right)^\beta + (1+\beta_1) c^\beta \left(\frac{r_i}{r} \right)^\beta - (1+c^\beta) \right] \frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \psi} \cos \theta; \\ \tau_{r\theta} &= \frac{q}{r_i \cdot b \cdot g_1} \frac{r_i}{r} \left[\left(\frac{r}{r_i} \right)^\beta + c^\beta \left(\frac{r_i}{r} \right)^\beta - (1+c^\beta) \right] \frac{\cos(\varphi - \psi)}{\cos \psi} \cos \theta; \end{aligned} \right\} (7)$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{1}{2(k^2 - 1)(1 - c^{2k})g} \left[2k(k-1)(1 - c^{k+1}) + 2k(k+1)c^{k+1}(1 - c^{k-1}) - \right. \\ &\left. - (k^2 - 1)(1+c)(1 - c^{2k})m \right]; \\ Q &= \frac{1}{2(k-1)(1 - c^{2k})g} \times \\ &\times \left[-(k-1)(1 - c^2) - 2k \cdot c^2(1 - c^{k-1}) + (k-1)(1+c)(1 - c^{k+1})m \right]; \\ R &= \frac{1}{2(k+1)(1 - c^{2k})g} \times \\ &\times \left[(k+1)c^{2k}(1 - c^2) - 2k \cdot c^{k+1}(1 - c^{k+1}) - (k+1)(1+c)c^{2k}(1 - c^{1-k})m \right], \end{aligned} \right\} (8)$$

где

$$c = \frac{a}{b}; \quad m = \frac{\sin \varphi \sin(\varphi - \psi)}{\cos \psi};$$

$$g = \frac{(1 - c^2)}{2} - \frac{k}{k+1} \frac{(1 - c^{k+1})^2}{1 - c^2} + \frac{k \cdot c^2}{k-1} \frac{(1 - c^{k-1})^2}{1 - c^{2k}}; \quad k = \sqrt{\frac{E_t}{E_r}};$$

$$g_1 = \frac{2}{\beta}(1 - c^\beta) + (1 + c^\beta) \ln c.$$

При расчетах 2-й группы анизотропных материалов по формулам (7) и (8) нужно иметь в виду, что коэффициент β зависит от k^2 , в отличие от первого случая: это следует из формулы С.Г. Лехницкого ((24.7), с. 98 [9]) и второго корня алгебраического уравнения (3):

$$B_{(2)} = \frac{1+5k^2}{3}, \text{ т. е.}$$

$$\beta = \sqrt{1 + \frac{E_t}{E_r}(1-2\mu_{rt}) + \frac{E_t}{G_{rt}}} = \sqrt{1+k^2 + \frac{1+5k^2}{3}} = \frac{2\sqrt{1+2k^2}}{\sqrt{3}}.$$

Формулы для расчета постоянных упругости при втором корне будут иметь вид [13]:

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_r} + \frac{\sin^4 \theta}{E_t} + \frac{1+5k^2}{3E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta;$$

$$\frac{1}{E_{y'}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_r} + \frac{\cos^4 \theta}{E_t} + \frac{1+5k^2}{3} \sin^2 \theta \cos^2 \theta;$$

$$\frac{1}{G_{x'y'}} = \frac{8(1-k^2)}{3E_t} \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{G_{rt}};$$

$$\mu_{x'y'} = -E_{x'} \left[\frac{2(1-k^2)}{3E_r} \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \frac{\mu_{rt}}{E_t} \right].$$

Соотношения постоянных упругости в круглых скобках (условно назовем параметром упругости) зависят от степени точности определения каждой из постоянных. Причем сама по себе величина коэффициента Пуассона мала, а при ее определении при наклоне слоев композита под углом 45° возможна неточность, как признают авторы методик Е.К. Ашкенази, А.Н. Митинский, Ю.С. Соболев.

Найденные значения параметров анизотропии позволяют устранить этот недостаток и облегчить решение дифференциального уравнения (1).

Поэтому расчет напряжений для ортотропных анизотропных тел с цилиндрической анизотропией, выполняемый по формулам (7) и (8) в одном случае с использованием коэффициента $\beta = 2$, в другом случае $\beta = \frac{2\sqrt{1+2k^2}}{\sqrt{3}}$, зависит от отношения модулей упругости $E_t/E_r = k^2$ конкретного анизотропного материала.

В таком случае потребуется предварительно определить, к какой группе относится анизотропный материал.

Среди многих вопросов при исследовании физических и механических свойств анизотропных материалов, в том числе и композиционных природного и синтетического происхождения, наибольший интерес представляют экстремальные свойства и положение главных плоскостей анизотропии.

Аналитическая зависимость модуля упругости известна из теории упругости:

$$\frac{1}{E_{x'}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_x} + \frac{\sin^4 \theta}{E_y} + \left(\frac{4}{E_{xy}^{(45)}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (9)$$

или при введении следующих обозначений:

$$E_x = E_0; \quad E_y = E_{90}; \quad E_{xy}^{(45)} = E_{45}; \quad E_{x'} = E_\alpha;$$

$$G_{xy} = G_0; \quad G_{xy}^{(45)} = G_{45}; \quad G_{x'y'} = G_\alpha; \quad \mu_{xy} = \mu_0; \quad \mu_{yx} = \mu_{90};$$

$$C = \frac{E_0}{E_{90}}; \quad b = \frac{E_0}{E_{45}} - \frac{1+C}{4}.$$

Вместо формулы (9) Е.К. Ашкенази было получено:

$$\frac{E_\alpha}{E_0} = \frac{1}{\cos^4 \theta + b \sin^2 2\theta + C \sin^2 \theta}.$$

Эту формулу можно применить для любой плоскости упругой симметрии.

Формула А. Митинского [14] для ортотропного тела обозначается:

$$G_{xy} = \frac{E_{xy}^{(45)}}{2(1 + \mu_{xy}^{(45)})}.$$

Последняя формула аналогична формуле для изотропных материалов:

$$G_{x'y'}^{(45)} = G_{(45)} = \frac{E_0 E_{90}}{E_0(1 + \mu_{90}) + E_{90}(1 + \mu_0)}.$$

Путем приравнявая к нулю первой производной $\frac{dE_\alpha}{d\alpha}$ Е.К. Ашкенази было получено [4]:

$$\left[\cos^2 \alpha - C \sin^2 \alpha - 2b(1 - 2\sin^2 \alpha) \right] \sin \alpha \cos \alpha = 0.$$

Первые два экстремума находят, приравнявая к нулю множитель за скобками, и получают $\alpha_1 = 0^\circ$; $\alpha_2 = 90^\circ$.

Третье экстремальное значение модуля упругости будет иметь место [8] при угле

$$a_3 = \arcsin \sqrt{\frac{1-2b}{1+C-4b}}$$

или с учетом подстановки формулы (2.31) из [4]:

$$a_3 = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \frac{E_0}{E_{45}} + \frac{1 - \frac{E_0}{E_{90}}}{2}}{1 + \frac{E_0}{E_{90}} - 4 \frac{E_0}{E_{45}} + \left(1 + \frac{E_0}{E_{90}}\right)}}.$$

Для равноармированного материала (при $C = 1$), например для фанеры, значение $\alpha_3 = 45^\circ$.

Третье экстремальное значение будет получено только в случае выполнения неравенства [15]:

$$1 \geq \frac{1-2b}{1+C-4b} \geq 0.$$

При несоблюдении этого условия модуль упругости будет иметь только два экстремума, как, например, у намоточных стеклопластиков и натуральной древесины в плоскости наибольшей жесткости (в направлении волокон).

Модуль упругости E_x ортотропно-анизотропного материала в произвольном направлении определяется выражением (2.28) из работы [4].

При произвольном направлении оси X' с учетом известного соотношения между направляющими косинусами:

$$n_1^2 + l_1^2 + m_1^2 = 1.$$

Е.К. Ашкенази получила значения направляющих косинусов:

1) при $n_1 = 0$

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\frac{3}{E_y} - \frac{4}{E_{yz}^{(45)}} + \frac{1}{E_z}}{\frac{4}{E_y} + \frac{4}{E_z} - \frac{8}{E_{yz}^{(45)}}}}; \quad l_1 = \pm \sqrt{1 - m_1^2};$$

2) при $m_1 = 0$

$$n_1 = \pm \sqrt{\frac{\frac{3}{E_y} - \frac{4}{E_x} + \frac{1}{E_{xy}^{(45)}}}{\frac{4}{E_y} + \frac{4}{E_x} - \frac{8}{E_{xy}^{(45)}}}}; \quad l_1 = \pm \sqrt{1 - n_1^2};$$

3) при $l_1 = 0$

$$n_1 = \pm \sqrt{\frac{\frac{4}{E_z} - 2A}{\frac{4}{E_x} + \frac{4}{E_z} - 4A}}; \quad m_1 = \pm \sqrt{1 - n_1^2},$$

$$\text{где } A = \frac{4}{E_{xz}^{(45)}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_z}.$$

В частных случаях: $m_1 = 0$; $l_1 = 0$; $n_1 = \pm 1$; $l_1 = 0$; $n_1 = 0$; $m_1 = \pm n_1 = 0$; $m_1 = 0$; $l_1 = \pm 1$ [4].

С этим решением в точности совпадает и решение [16].

Одно из них получено впервые, а второе вытекает из решения задачи анизотропии криволинейного ортотропного тела С.Г. Лехницкого, и полученное решение ему не противоречит.

При анализе напряженно-деформированного состояния, с учетом полученных соотношений между постоянными упругости, становится возможным получить достоверную информацию для ортотропных материалов с цилиндрической анизотропией.

Таким образом, результаты исследования представляют собой важный вклад в понимание влияния анизотропии на физико-механические свойства композиционных материалов с цилиндрической анизотропией и могут быть использованы в инженерной практике для разработки новых материалов с оптимальными характеристиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глухих В.Н. Анизотропия упругости волокнистых композиционных материалов. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 94 с.
2. *Новейшие достижения* в обработке отверстий в композиционных материалах // Композитный мир. 2015. № 1 (58). С. 42–46. EDN: MWPXRG
3. Акопян А.Л., Глухих В.Н., Прилуцкий А.А. К вопросу использования некоторых особенностей природных материалов при разработке композитов для строительных конструкций // Фундаментальные исследования. 2016. № 3-2. С. 235–239. EDN: TMYVOF
4. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. Москва : Лесная промышленность, 1978. 221 с.
5. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Москва : Гостехиздат, 1977. 415 с.
6. Glukhikh V. Problem of the anisotropy of elasticity and strength in anisotropic fiber materials // Architecture and Engineering. 2021. V. 6. №. 2. P. 31–36. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-2-31-36. EDN: AXEODS
7. Kaldar-Ool A.-Kh., Glukhikh V., Opbul E., Saaya S. Stress condition of brick barrel vaults in view of anisotropic properties // Magazine of Civil Engineering. 2021. №. 5 (105). P. 10509. DOI: 10.34910/MCE.105.9. EDN: YQLQCO
8. Глухих В.Н., Красильникова С.С. Анализ модуля упругости анизотропного материала на примере древесины // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 21–26. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-21-26. EDN: YYZGZZ
9. Лехницкий С.Г. Анизотропные пластинки. Москва : Гостехиздат, 1957. 463 с.
10. Kaldar-Ool A.-Kh., Opbul E. Stress condition of orthotropic vault structure with cylindrical anisotropy // Magazine of Civil Engineering. 2022. №. 8 (116). P. 11605. DOI: 10.34910/MCE.116.5. EDN: GVMVOM
11. Курдюмов Н. Решение в полиномах плоской задачи теории упругости // ПММ. 1946. Т. XI.
12. Калдар-оол А.-Х.Б. Совершенствование методов расчета напряженного состояния коробовых сводов в зданиях-памятниках архитектуры – объектах культурного наследия : специальность 05.23.01 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Калдар-оол Анай-Хаак Бугалдаевна. Санкт-Петербург, 2020. 192 с.
13. Глухих В.Н., Калдар-оол А.-Х.Б. Анизотропия кирпичных коробовых сводов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 6 (77). С. 130–136. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-130-136. EDN: SZVJRH
14. Митинский А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала // Труды ЛТА. 1948. № 63. С. 23–54.
15. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов : справочник. Москва : Лесная промышленность, 1981. 320 с.
16. Глухих В.Н., Петров В.М., Соїту Н.Ю. Определение постоянных упругости с учётом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. Вып. 2 (36). С. 137–143.

REFERENCES

1. *Glukhikh V.N.* Anisotropic elasticity of fibrous composite materials. Saint-Petersburg, 2018. 94 p. (In Russian)
2. The latest achievements in hole processing in composite materials. *Kompozitnyi mir*. 2015; 1 (58). Pp. 42–46. (In Russian)
3. *Akopyan A.L., Glukhikh V.N., Prilutskiy A.A.* The use of natural materials in composite development in building industry. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016; 3, 235–239. (In Russian)
4. *Ashkenazi E.K.* Anisotropy of wood and wood materials. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1978. 221 p. (In Russian)
5. *Lekhnitskiy S.G.* Theory of elasticity of anisotropic body. Moscow: Gostekhizdat, 1977. 415 p. (In Russian)
6. *Glukhikh V.* Problem of the anisotropy of elasticity and strength in anisotropic fiber materials. *Architecture and Engineering*. 2021; 6 (2): 31–36. DOI: 10.23968/2500-0055-2021-6-2-31-36
7. *Kaldar-Ool A.-Kh., Glukhikh V., Opbul E., Saaya S.* Stress condition of brick barrel vaults in view of anisotropic properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 5 (105): 10509. DOI: 10.34910/MCE.105.9
8. *Glukhikh V.N., Krasilnikova S.S.* Elasticity modulus of anisotropic wood. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017; 3 (62): 21–26. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-21-26. (In Russian)
9. *Lekhnitskiy S.G.* Anisotropic plates. Moscow: Gostekhizdat, 1957. 463 p. (In Russian)
10. *Kaldar-Ool A.-Kh., Opbul E.* Stress condition of orthotropic vault structure with cylindrical anisotropy. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 8 (116): 11605. DOI: 10.34910/MCE.116.5
11. *Kurdyumov N.* Polynomial solution of plane elasticity problem. *Prikladnaya matematika i mekhanik*. 1946; 11. (In Russian)
12. *Kaldar-ool A.-K.B.* Calculation improvement of stress-strain state of barrel vaults in architectural monuments of cultural heritage. PhD Thesis. Saint-Petersburg, 2020. 192 p. (In Russian)
13. *Glukhikh V.N., Kaldar-ool A.K.B.* Anisotropy of brick barrel vaults. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2019; 6 (77): 130–136. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-6-130-136 (In Russian)
14. *Mitinsky A.N.* Elastic constants of orthotropic wood. *Trudy LTA*. 1948; (63): 23–54. (In Russian)
15. *Ashkenazi Ye.K., Ganov V.V.* Anisotropy of construction materials. Reference book. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1981. 320 p. (In Russian)
16. *Glukhikh V.N., Petrov V.M., Soytu N.Yu.* Elastic constants of anisotropic composite materials for winding of shells and beams in shipbuilding and sea port infrastructure. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2016; 2 (36): 137–143. (In Russian)

Сведения об авторах

Калдар-оол Анай-Хаак Бугалдаевна, канд. техн. наук, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, oorzhaka-h@mail.ru

Сандан Руслан Николаевич, канд. техн. наук, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, ruzzzlan@mail.ru

Монгуш Алдын-Херел Хеймерович, магистрант, Тувинский государственный университет, 667000, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Ленина, 36, mongush.aldyn97@mail.ru

Authors Details

Anai-Khaak B. Kaldar-ool, PhD, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, oorzhaka-h@mail.ru

Ruslan N. Sandan, PhD, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, ruzzzlan@mail.ru

Aldyn-Kherel H. Mongush, Graduate Student, Tuvan State University, 36, Lenin Str., 667000, Kyzyl, Russia, mongush.aldyn97@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023
Одобрена после рецензирования 24.04.2024
Принята к публикации 26.04.2024

Submitted for publication 28.06.2023
Approved after review 24.04.2024
Accepted for publication 26.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 170–182.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 170–182.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 539.387.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-170-182

EDN: ZNQACW

ВЛИЯНИЕ ИЗГИБА АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ С ПОСЛЕДУЮЩИМ РАЗГИБОМ НА ИХ ПРОЧНОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**Андрей Сергеевич Пляскин, Андрей Вадимович Матвеев,
Анна Игоревна Бабарыкина, Виолетта Николаевна Коньшева**
*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Рассматривается влияние начального изгиба и последующего разгиба арматурных стержней на механические характеристики стали.

Актуальность. Данная проблема актуальна в практике строительства монолитных железобетонных конструкций, т. к. при производстве работ часто возникают ситуации, в которых отдельные арматурные стержни каркасов получают начальный изгиб, и возникает вопрос о возможности их дальнейшего использования.

Цель исследования. Определение возможности применения арматурных стержней с начальным изгибом и последующим разгибом для железобетонных конструкций при варьировании параметрами начального изгиба.

Результаты. По результатам экспериментальных исследований приведен сравнительный анализ механических характеристик образцов арматурных стержней, испытанных на растяжение на разрывной машине при варьировании начального диаметра загиба. Результаты испытаний позволяют сделать вывод о возможности дальнейшего использования арматурных стержней, подверженных однократному изгибу и обратному разгибу без снижения прочностных характеристик стали.

Ключевые слова: арматурные стержни, железобетонные конструкции, начальный изгиб, прочность на растяжение, повторное применение

Для цитирования: Пляскин А.С., Матвеев А.В., Бабарыкина А.И., Коньшева В.Н. Влияние изгиба арматурных стержней с последующим разгибом на их прочность при растяжении // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 170–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-170-182. EDN: ZNQACW

ORIGINAL ARTICLE

TENSILE STRENGTH OF REINFORCING BARS AFTER BENDING-UNBENDING

Andrei S. Plyaskin, Andrei V. Matveev,
Anna I. Babarykina, Violetta N. Konyshva

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract: The article studies the influence of bending and unbending of reinforcing bars on the mechanical properties of steel bars. This problem is relevant in the practice of constructing monolithic reinforced concrete structures, since reinforcing bars are often subjected to initial bending. The question arises about their further use. Based on the results obtained, a comparative analysis of the mechanical properties is presented for reinforcing bars after tensile strength testing with varying the initial bend diameter. According to this testing, it is possible to further use these reinforcing bars after single and reverse bending without reducing the strength properties of the steel.

Keywords: reinforcing bars, reinforced concrete structures, initial bending, tensile strength, reuse

For citation: Plyaskin A.S., Matveev A.V., Babarykina A.I., Konyshva V.N. Tensile strength of reinforcing bars after bending-unbending. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 170–182. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-170-182. EDN: ZNQACW

Введение

В практике производства железобетонных конструкций часто возникают случаи появления начального изгиба как отдельных арматурных стержней, так и групп стержней, составляющих арматурный каркас.

Появление начального изгиба, как правило, связано с нарушением технологии производства строительно-монтажных работ (СМР), ошибками в проектно-сметной документации (ПСД), несоблюдением условий транспортировки, хранения и в связи с влиянием прочих неучтенных факторов. Кроме того, необходимость повторного использования арматуры обусловлена потребностью в сохранении основных ресурсов и энергии при изготовлении или переработке стальной арматуры. В большинстве случаев повторного применения арматуры будут иметь место начальные деформации.

Современные методы правки арматурных стержней [1] не способны вернуть им первоначальную геометрию, что приводит к отклонениям механических характеристик арматуры от стандартных значений. Поэтому надежность строительных конструкций зданий и сооружений, изготовленных с применением изначально изогнутой или повторно используемой выпрямленной арматуры, остаётся под сомнением. Фактические механические характеристики такой арматуры не изучены в полной мере, позволяющей сделать окончательный вывод о возможности ее повторного применения.

Обзор исследований в области влияния изгиба арматурных стержней на их механические характеристики

Анализ базы современных отечественных нормативно-технических документов показал, что в существующих технических регламентах присутству-

ет только информация о возможности использования согнутой арматуры для изготовления арматурных каркасов. При этом устанавливается только ограничение на минимальные радиусы изгиба в зависимости от диаметра арматурных стержней. Влияние сгиба с последующим разгибом (выпрямлением) арматурных стержней на механические характеристики стали в технических регламентах не оговорено, а также не стандартизированы пределы допустимых параметров изгиба и разгиба.

В зарубежной практике известны случаи повторного применения арматурных стержней, сопряженного с технологическими операциями по их чистке и правке, поэтому проведен тщательный поиск научных статей по данной тематике в зарубежных источниках. Приведем основные положения и результаты этих исследований.

Исследователи из корейского института провели испытания стальных стержней, которые показали, что в результате изгиба и последующего разгиба арматуры прочность стержней увеличивается, при этом наблюдается снижение предела текучести [2].

Индонезийскими учёными были проведены экспериментальные исследования возможности повторного применения арматурных стержней диаметром от 16 до 32 мм с углом сгиба в 180° [3]. Визуальным осмотром установлено отсутствие трещин или сколов после испытаний. Однако в процессе изгиба и последующего разгиба выявлены изменения в материале, влияющие на прочностные характеристики арматурных стержней. Испытания в несколько циклов изгиба и обратного выгиба стержней диаметром 8, 10 и 12 мм показали, что с увеличением диаметра арматуры влияние разгиба возрастает. В частности, относительное удлинение с каждым циклом изгиба-разгиба уменьшается, а прочность на растяжение снижается, и для больших диаметров момент полного разрушения наступает раньше. Для арматуры диаметром 8 мм было установлено значение в четыре цикла, а для диаметров в 10 и 12 мм – три цикла, после которых образец полностью разрушался. Тем не менее значение предела прочности стали, установленное после одного цикла, показало незначительное снижение (от 1 до 3 %) по сравнению с эталонными (недеформированными) образцами [4]. Вывод о незначительном снижении предела прочности стержней сделали и учёные из Кении [5].

Транспортный центр штата Вашингтон (TRAC) представил результаты экспериментальных исследований [6] для арматуры различных диаметров при «холодном» и «горячем» изгибе, на основании которых даны рекомендации для допустимого выгиба арматуры в полевых условиях. Так, если диаметр арматуры превышает 14 мм, то выгиб арматуры в полевых условиях не допускается.

Результат выпрямления арматуры зависит не только от её диаметра, но также и от химического состава материала, диаметра изгиба, температуры при изгибе и выпрямлении. Кроме того, при случайном повреждении арматуры её изгиб может произойти в любом направлении. Поэтому при проведении экспериментальных исследований необходимо учитывать ось изгиба арматуры. В зарубежных источниках выделяют две оси арматуры: слабую – с продольным ребром на нейтральной оси стержня и сильную – с продольным ребром по краям стержня при изгибе. Так, исследование, опубликованное Concrete

Reinforcing Steel Institute (CRSI) в 1982 г. [7], показало, что арматура диаметром 5 и 8 мм может быть изогнута, а затем выпрямлена при комнатной температуре без значительного снижения прочности и появления трещин. Для большего диаметра, равного 11 мм, критичным является изгиб вокруг сильной оси, при котором возрастает вероятность разрушения образца.

Экспериментальные исследования возможности повторного применения арматурных стержней после демонтажа железобетонных конструкций приведены в работе [8]. Исследование показало, что арматурные стержни, извлеченные при демонтаже железобетонных конструкций, после очистки и правки обеспечили необходимое усилие сцепления арматуры с бетоном и могут быть повторно использованы в качестве рабочей арматуры. Арматурные стержни диаметром до 24 мм могут быть успешно изогнуты и обратно выгнуты в полевых условиях, но прутки большего диаметра будут сохранять свои свойства только при гибке с применением нагрева.

Для достижения экономического эффекта, при использовании транспортными средствами ограниченных габаритов, за счет загиба и уменьшения длины арматурных стержней были проведены исследования о влиянии угла загиба арматурного стержня на показатели пределов прочности, текучести и пластичности [9]. В результате испытаний было выявлено, что после изгиба прочность стержней возросла, при этом пластичность арматуры снизилась. Изгиб стержня на 180° привёл к увеличению предела текучести на 14 % и предела прочности на 7 %.

Экспериментальные исследования возможности повторного применения демонтированной арматуры затрагивают также надежность сцепления с бетоном. В испытаниях, проведенных зарубежными исследователями, использовали очищенную и выпрямленную арматуру диаметром 12, 14 и 16 мм и бетон прочностью на сжатие 20 и 35 МПа. В результате испытаний на отрыв повторно используемая арматура показала достаточность усилия сцепления с бетоном, поэтому она может быть повторно применяться в несущих конструкциях [10].

По данным сайта [statista.com](https://www.statista.com), в период с 2011 по 2022 г. мировое производство стали выросло на 20 %: 2012 г. – 1563 млн т за год, 2022 г. – 1885 млн т. В связи с таким интенсивным ростом потребности стали все чаще ставится вопрос о повторном применении арматуры в целях экономии природных ресурсов и снижения негативного воздействия на окружающую среду [11, 12, 13, 14].

Цель и задачи проведенных исследований

В проведенных исследованиях, отраженных в настоящей статье, поставлена следующая цель: определение возможности применения арматурных стержней с начальным изгибом и последующим разгибом для железобетонных конструкций при варьировании параметрами начального изгиба. Основными задачами исследования являются:

- подготовка образцов арматурных стержней с начальным изгибом при варьировании радиуса начального изгиба;
- проведение механических испытаний этих образцов на растяжение после разгиба;

- проведение механических испытаний эталонных (недеформированных) образцов арматурных стержней;
- выполнение сопоставительного анализа механических характеристик арматурных стержней с начальным изгибом и последующим разгибом с механическими характеристиками эталонных стержней.

Описание проведенных исследований и полученных результатов

Параметры начального изгиба арматурных стержней были установлены на основании реальной ситуации, произошедшей при изготовлении арматурного каркаса на одной строительной площадке Томской области. Подготовленный для бетонирования железобетонной несущей конструкции арматурный каркас деформировало вследствие воздействия неучтенного ураганного ветра и недостаточного раскрепления арматурного каркаса при монтаже. Проведено первичное визуальное обследование деформированного каркаса, которое показало потерю устойчивости двух параллельных продольных граней каркаса относительно продольной и поперечной осей. Общий вид полученных деформаций каркаса представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид деформации арматурного каркаса:

a – по продольной оси; *б* – по поперечной оси

Fig. 1. General view of of reinforcement bar deformation:

a – along the longitudinal axis; *b* – along the transverse axis

Визуальный осмотр бетона у основания арматурного каркаса на участках анкеровки арматурных стержней не выявил никаких дефектов, трещины в бетоне, вспучивания и другие признаки нарушения целостности бетонного

массива отсутствовали. Это позволило сделать вывод о целостности анкеровки арматуры в теле бетона. Визуальная и приборная дефектоскопия мест загибов арматурных выпусков также не обнаружила трещин и переломов арматуры. Оставалось решить вопрос о возможности использования погнутой арматурных выпусков при замене каркаса на новый. Для этого выполнены подробные инструментальные обмеры геометрии выпусков арматуры в деформированном состоянии.

Измерение углов и радиусов загиба арматурных выпусков в узлах анкеровки показало, что в большинстве случаев рабочие стержни арматуры имеют незначительные загибы, не превышающие нормативные значения угла и диаметра оправки (рис. 2). В соответствии с п. 8.3.30 СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры» разрешается применение гнутой арматуры (отгибы, загибы концов стержней) минимальным диаметром оправки $d_{оп}$ для стержней периодического профиля $d_{оп} = 8d_s$ при $d_s \geq 20$ мм. Следует отметить, что в действующей нормативно-технической документации отсутствуют требования и ограничения относительно параметров начального изгиба с последующим выгибом, которые могли бы предъявляться к арматуре для железобетонных конструкций.



Рис. 2. Определение угла загиба арматурного выпуска:

a – по цифровой оси; б – по буквенной оси

Fig. 2. Detection of the bend angle of the protruding bar:

a – along the numerical axis; b – along the letter axis

Максимальные деформации выявлены у двух арматурных выпусков, у которых угол загиба составил 135° , а радиусы загиба – 49 и 52 мм (рис. 3).



Рис. 3. Арматурный выпуск с углом загиба 135° и радиусом загиба 49 мм

Fig. 3. Protruding bar with a 135° bend angle and 49 mm bend radius

Для оценки влияния обратного выгиба на механические характеристики арматурных стержней диаметром 25 мм класса А400 проведены лабораторные исследования трех серий стержней с углами загиба 130 – 138° и радиусами загиба 20, 40, 90 мм. Опытные образцы серий с радиусами загиба 20, 40 и 90 мм и соответствующими углами загиба представлены на рис. 4–6, всего было испытано девять опытных образцов. Помимо этого, для сопоставительного анализа и выявления возможного ухудшения механических характеристик стали исследуемых образцов были выполнены испытания трех эталонных (недеформированных) образцов.

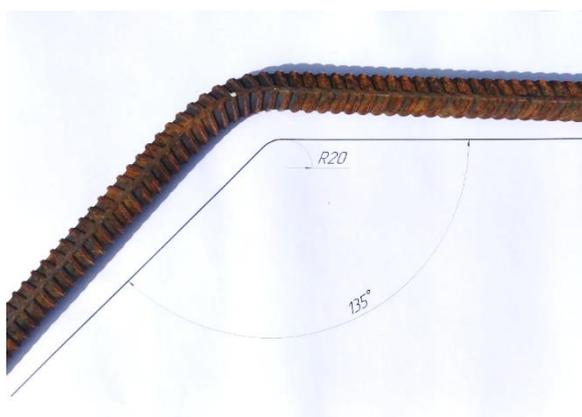


Рис. 4. Опытный образец с радиусом загиба 20 мм и углом загиба 135°

Fig. 4. A sample with 20 mm bend radius and 135° bend angle

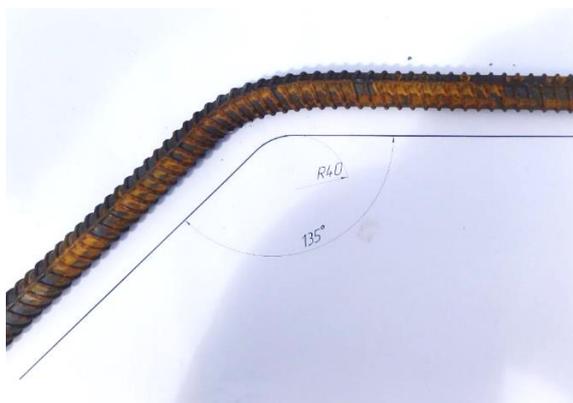


Рис. 5. Опытный образец с радиусом загиба 40 мм и углом загиба 135°
Fig. 5. A sample with 40 mm bend radius and 135° bend angle

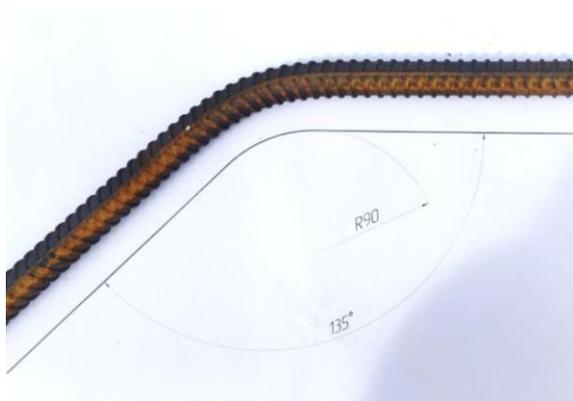


Рис. 6. Опытный образец с радиусом загиба 90 мм и углом загиба 135°
Fig. 6. A sample with 90 mm bend radius and 135° bend angle

После загиба опытных арматурных стержней выполнялся обратный выгиб без использования предварительного нагрева и без последующей правки. Далее была проведена визуальная диагностика на соблюдение требований п. 5.7.4 ГОСТ 34028–2016, в котором указано, что после испытаний проката на изгиб с разгибом на образцах не должно быть трещин и разрывов, видимых без применения увеличительных приборов. По результатам диагностики было констатировано, что указанные дефекты отсутствуют полностью.

В зарубежных технических регламентах следует отметить наличие требований к арматуре относительно параметров начального изгиба с последующим выпрямлением. Согласно п. 17.2.3.1 Австралийского стандарта железобетонных конструкций AS 3600, арматура, которая была согнута, а затем выпрямлена или согнута в обратном направлении, не должна снова изгибаться в пределах 20 диаметров стержня от предыдущего изгиба. Данное требование должно исключить возможность деформационного упрочнения стержня и последующей потери пластичности. Также вводится требование на недопустимость перегиба стержней сверх исходного изгиба, не более 90°. Кроме того,

если рассматривается возможность обратного выгиба стержней, залитых в бетон, то в первую очередь арматуру следует очистить [15].

Испытания серий опытных арматурных стержней проведены в соответствии с ГОСТ 12004–81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение». Общий вид образцов после обратного выгиба показан на рис. 7.

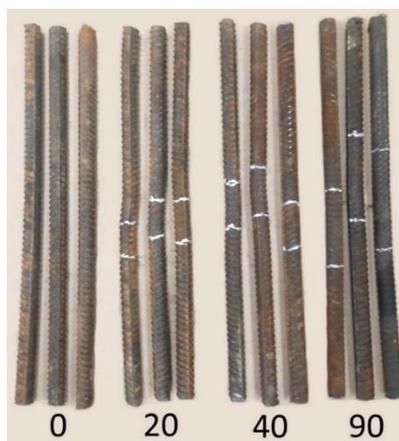


Рис. 7. Общий вид опытных образцов после обратного выгиба (цифрами обозначен радиус загиба, 0 – эталонные стержни)

Fig. 7. General view of samples after unbending (numbers indicate bending radius, 0 – reference rods)

Основные значения механических характеристик, полученные по результатам проведенных испытаний опытных стержней на растяжение, приведены в таблице. Общий вид арматурных стержней после испытаний представлен на рис. 8. По визуальным признакам характер разрушения опытных образцов всех трех серий соответствует характеру разрушения эталонных опытных образцов.



Рис. 8. Общий вид образцов после испытаний

Fig. 8. General view of samples after testing

Механические характеристики, полученные по результатам проведенных испытаний опытных стержней на растяжение

Mechanical properties after tensile strength testing

Образец №	Радиус загиба, мм	Угол загиба, град	Разрывное усилие, Н	Временное сопротивление σ_b , Н/мм ² ГОСТ 34028–2016	Фактическое временное сопротивление σ_b , Н/мм ²
1	–	–	328 980	590	670
2	–	–	317 580	590	650
3	–	–	316 750	590	650
4	20	135	333 020	590	680
5	20	130	309 980	590	630
6	20	133	327 670	590	670
7	40	135	337 850	590	690
8	40	134	313 460	590	640
9	40	135	316 060	590	640
10	90	138	325 020	590	660
11	90	135	322 200	590	660
12	90	132	303 320	590	620

Согласно п. 5.6.1 ГОСТ 34028–2016, механические свойства проката при температуре испытания (20^{+15}_{-10}) °С и стандартной категории пластичности должны соответствовать нормам, указанным в табл. 5 ГОСТ 34028–2016.

Для сопоставления данных в вышеприведенной таблице указано нормативное значение временного сопротивления σ_b (из табл. 5 ГОСТ 34028–2016), которое для испытанной арматуры класса А400 составляет 590 МПа. Проанализировав данные составленной таблицы, заключаем, что фактические значения временного сопротивления трех серий опытных образцов и эталонных (недеформированных) образцов не ниже нормативных значений. Превышение фактического значения временного сопротивления относительного нормативного значения для эталонных образцов в среднем составляет 11,3 %. Для опытных образцов с начальным изгибом и последующим обратным выгибом превышение фактического значения временного сопротивления находится в диапазоне от 5,1 до 17 %. Остальные механические характеристики, такие как предел текучести и относительное удлинение, для всех испытанных образцов оказались не ниже нормативных значений. Соответственно, полученные опытным путем механические характеристики испытанных образцов удовлетворяют требованиям ГОСТ 34028–2016.

Сравнение частных значений временного сопротивления эталонных образцов и образцов трех серий показывает их незначительное расхождение, которое составляет от 3,6 % в сторону понижения, до 5,6 % в сторону повышения.

Выводы

Проведенные испытания показали, что разрушающая нагрузка при растяжении для всех арматурных стержней не превысила нормативное значение.

Прочность при растяжении арматурных стержней А400 диаметром 25 мм с начальным изгибом и последующим обратным выгибом для радиусов загиба от 20 до 90° с углом загиба 135° удовлетворяет требованиям ГОСТ 34028–2016. Для вышеописанного случая деформации арматурных каркасов на основании результатов экспериментальных исследований было выдано положительное заключение о возможности дальнейшего использования арматурных выпусков после правки стержней в проектное положение.

Кроме того, следует отметить необходимость соблюдения требований технических регламентов при правке погнутых стержней. Например, изгиб или повторный изгиб арматурных стержней следует выполнять с помощью специальных гибочных инструментов. Не допускается применение молотков и не рекомендуется применять трубы для гибки арматуры, т. к. это может привести к получению неконтролируемого диаметра изгиба или повреждению стержня. Однако трубы диаметром не менее $2d_b$ могут быть использованы для выпрямления ранее согнутого стержня при условии, что они имеют длину не менее 1,2 м. Требуемое усилие прикладывается равномерно вдоль стержня, а изгиб выполняется одним плавным непрерывным действием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Deepu S., Vishnu R.S., Harish M., Bhavani R. An Experimental Study of Force Involved in Manual Rebar Bending Process // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 310. № 1. P. 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/310/1/012050
2. Chun S., Tak S., Ha T. Mechanical Properties and Stress-Strain Model of Re-Bars Coldly Bent and Straightened // Journal of The Korea Concrete Institute. 2012. V. 24. № 2. P. 195–204. DOI: 10.4334/JKCI.2012.24.2.195
3. Warsianto H., Narayudha M. Bending of reinforcing bars testing method and influence on structures // Teknik. 2012. V. 30. № 2. P. 79–82.
4. Domski J., Katzer J., Zakrzewski M. Mechanical characteristics of used bent rebars as a factor limiting their reuse. Koszalin University of Technology, Poland, 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/305327344_Mechanical_characteristics_of_used_bent_rebars_as_a_factor_limiting_their_reuse/references
5. Mwero J., Ochieng S.A. Residual Strength of Reworked Steel Reinforcement Bars // International journal of scientific and research publications. 2018. V. 8. № 6. DOI: 10.29322/IJSRP.8.6.2018.P7811
6. Babaei K., Hawkins N.M. Development of standard specifications for bending/straightening concrete reinforcing steel // Washington State Department of Transportation. Technical Report № WA-RD 216.1, 1991. URL: <https://depts.washington.edu/trac/bulkdisk/pdf/216.1.pdf>
7. Stecich J., Hanson J.M., Rice P.F. Bending and Straightening of Grade 60 Reinforcing Bars // Concrete International: Design & Construction. 2008. V. 7. № 3. P. 14–23.
8. Bsisu K.A.-D., Salem Z.A. Recycling of Steel Bars from Demolished Structures // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. V. 13. № 1. P. 94–99.
9. Ikhwan K.S., Dalil M. Effect of Bending and Straightening to the Strength of Reinforcement Steel Bar // Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace. Science and Engineering. 2015. V. 15. P. 12–17.
10. Khair Al-Deen Bsisu, Zaydoun Abu Salem. Recycling of Steel Bars from Demolished Structures // International Journal of Engineering Research and Technology. 2020. V. 13. № 1. P. 94–99.
11. Molina-Moreno F., Marti J., Yepas V., Cirot A. Environmental impact shares of a reinforced concrete earthretaining-wall with buttresses // Proceedings of International Structural Engineering and Construction. 2017. V. 4. № 1. DOI: 10.14455/ISEC.res.2017.78

12. Олейник С.П. Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // Отходы и ресурсы : интернет-журнал. 2016. Т. 3. № 2. DOI: 10.15862/02RRO216
13. Kim S., Kim. S.-A. Framework for Designing Sustainable Structures through Steel Beam Reuse // Sustainability (Multidisciplinary Digital Publishing Institute). 2020. V. 12. № 22. P. 9494. DOI: 10.3390/su12229494
14. Lapko A., Grygo R. Effectiveness of the use of recycling aggregate concrete for sustainable building structures // Rocznik Ochrona Srodowiska. 2014. V. 16. P. 627–638.
15. Bending Reinforcement On Site. Steel reinforcement institute of Australia. Concrete in Australia. 2016. V. 42. № 4. URL: <https://www.sria.com.au/publication-concrete-in-australia>

REFERENCES

1. Deepu S., Vishnu R.S, Harish M., Bhavani R. An experimental study of force involved in manual rebar bending process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 310 (1): 012050. DOI: 10.1088/1757-899X/310/1/012050
2. Chun S., Tak S., Ha T. Mechanical properties and stress-strain model of re-bars coldly bent and straightened. *Journal of The Korea Concrete Institute*. 2012; 24 (2): 195-204. DOI: 10.4334/JKCI.2012.24.2.195
3. Warsianto H., Narayudha M. Bending of reinforcing bars testing method and influence on structures. *Teknik*. 2012; 30 (2): 79–82.
4. Dowski J., Katzer J., Zakrzewski M. Mechanical characteristics of used bent rebars as a factor limiting their reuse. Koszalin University of Technology. Poland, 2016. Available: www.researchgate.net/publication/305327344_Mechanical_characteristics_of_used_bent_rebars_as_a_factor_limiting_their_reuse/references
5. Mwero J., Ochieng S.A. Residual strength of reworked steel reinforcement bars. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2018; 8 (6). DOI: 10.29322/IJSRP.8.6.2018.P7811
6. Babaei K., Hawkins N.M. Development of standard specifications for bending/straightening concrete reinforcing steel. Washington State Department of Transportation. Technical Report No. WA-RD 216.1, 1991. Available: <https://depts.washington.edu/trac/bulkdisk/pdf/216.1.pdf>
7. Stecich J., Hanson J.M., Rice P.F. Bending and straightening of grade 60 reinforcing bars. *Concrete International: Design and Construction*. 2008; 7 (3): 14–23.
8. Bsisu K.A-D., Salem Z.A. Recycling of steel bars from demolished structures. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020; 13 (1): 94–99.
9. Ikhwan K.S., Dalil M. Effect of bending and straightening to the strength of reinforcement steel bar. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace. Science and Engineering*. 2015; 15: 12–17.
10. Khair Al-Deen Bsisu, Zaydoun Abu Salem. Recycling of steel bars from demolished structures. *International Journal of Engineering Research and Technology*. 2020; 13 (1): 94–99.
11. Molina-Moreno F., Marti J., Yepas V., Cirotto A. Environmental impact shares of a reinforced concrete earth retaining-wall with buttresses. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*. 2017; 4 (1). DOI: 10.14455/ISEC.res.2017.78
12. Oleinik S.P. Construction waste during the reconstruction of buildings and structures. *Otkhody i resursy*. 2016; 3 (2). DOI: 10.15862/02RRO216 (In Russian)
13. Kim S., Kim. S.-A. Framework for designing sustainable structures through steel beam reuse. *Sustainability (Multidisciplinary Digital Publishing Institute)*. 2020; 12 (22): 9494. DOI: 10.3390/su12229494
14. Lapko A., Grygo R. Effectiveness of the use of recycling aggregate concrete for sustainable building structures. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2014; 16: 627–638.
15. Bending Reinforcement on Site. Steel reinforcement institute of Australia. Concrete in Australia V42 N4. 2016. Available: www.sria.com.au/publication-concrete-in-australia

Сведения об авторах

Пляскин Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, plyaskinandrei@mail.ru

Матвеев Андрей Вадимович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, andrsv2000@rambler.ru

Бабарыкина Анна Игоревна, магистрант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, babarykina.anna.i@yandex.ru

Коньшева Виолетта Николаевна, студентка, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная 2, konysheva03@bk.ru

Authors Details

Andrei S. Plyaskin, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, plyaskinandrei@mail.ru

Andrei V. Matveev, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, andrsv2000@rambler.ru

Anna I. Babarykina, Graduate Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, babarykina.anna.i@yandex.ru

Violetta N. Konysheva, Student, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, konysheva03@bk.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.04.2024
Одобрена после рецензирования 26.04.2024
Принята к публикации 29.04.2024

Submitted for publication 18.04.2024
Approved after review 26.04.2024
Accepted for publication 29.04.2024

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES, FOUNDATIONS AND SUBSTRUCTURES

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 183–195.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 183–195.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.15

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195

EDN: UULCUW

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОСНОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ ФУНДАМЕНТА

Сергей Владимирович Никифоров

АО «Синергия», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Стремительные темпы роста высоких и сверхвысоких зданий и сооружений в различных городах мира и в нашей стране вызывают изменение принципов их проектирования, строительства и мониторинга на этапах возведения и эксплуатации. Это связано с большими вертикальными и климатическими нагрузками на сооружения, необходимостью более эффективного использования материальных ресурсов и сокращения сроков ввода сооружений в эксплуатацию.

Цель исследования – оптимизация производственных процессов при строительстве фундаментных конструкций сверхвысотных зданий и сооружений.

Научная новизна – определение наиболее значимых факторов, оказывающих влияние на выбор производственных процессов при возведении сверхвысотных зданий и сооружений.

Выводы. Приводятся результаты мониторинга коробчатого фундамента башни комплекса «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге высотой 462 м, являющейся самым высоким зданием в Европе. Дано описание структуры, принципов построения и функционирования автоматизированной системы мониторинга комплекса «Лахта Центр»; приведены и проанализированы результаты геотехнического мониторинга и мониторинга напряженно-деформированного состояния конструкций фундамента. Основные результаты данного исследования могут быть применены при эксплуатации и проектировании уникальных зданий и сооружений при их размещении на слабых структурно-неустойчивых грунтах.

Ключевые слова: высотные здания, коробчатый фундамент, свайное основание, слабые грунты, испытания свай, геотехнический мониторинг, мониторинг напряженно-деформированного состояния

Для цитирования: Никифоров С.В. Автоматизированная система мониторинга основания и конструкций фундамента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195. EDN: UULCUW

ORIGINAL ARTICLE

**AUTOMATED MONITORING SYSTEM
FOR BUILDING FOUNDATION STRUCTURES****Sergey V. Nikiforov***AO “Synergy”, Saint-Petersburg, Russia*

Abstract. The number of tall and supertall buildings dramatically grows in Russian and abroad, that drives transformation of design, construction and monitoring principles. Such changes are necessitated by higher vertical and climatic loads on structures, need for a more efficient use of materials and early commissioning.

Purpose: Optimization of production processes in foundation structures of super tall buildings.

Methodology: The analysis of results of geotechnical monitoring and stress-strain state of foundation structures.

Research findings: The applicability of foundations in operation and design of unique buildings designed for structurally unstable soils. Results of monitoring are presented for a 462 m high box-shaped foundation of a tower, a central building of the “Lakhta Center” in Saint-Petersburg, and the tallest building in Europe. The automated monitoring system is used to study the structure, design and operation principles of the “Lakhta Center”.

Value: Determination of the most significant factors influencing the choice of production processes during the construction of super-tall buildings.

Keywords: high-rise buildings, box-shaped foundation, pile foundation, soft soil, pile testing, geotechnical monitoring, stress-strain state

For citation: Nikiforov S.V. Automated monitoring system for building foundation structures. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 183–195. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-183-195. EDN: UULCUW

Введение

Мониторинг высотного здания является важным инструментом контроля безопасности строительства уникального сооружения и осуществляется на всех стадиях возведения небоскреба.

Мониторинг механической безопасности заключается в одновременном проведении мониторинга параметров и мониторинга технического состояния. Измеренные значения параметров состояния объекта (осадок, кренов, напряжений в конструкциях, ширины раскрытия трещин, уровня грунтовых вод, горизонтальных смещений и т. п.) необходимо сравнивать с прогнозируемыми значениями, рассчитанными по математической компьютерной модели объекта для текущего этапа строительства с учетом фактора времени.

Описание системы мониторинга

Мониторинг высотного здания является важным инструментом контроля безопасности строительства уникального сооружения и осуществляется на всех стадиях строительства небоскреба.

Мониторинг высотного здания (рис. 1) можно подразделить на несколько измерительных комплексов:

- 1) геотехнический мониторинг за горизонтальными смещениями ограждения котлована производится на стадии выемки котлована и устройства конструкций подземного объема здания;
- 2) геотехнический мониторинг за напряженно-деформированным состоянием основания производится на стадии выемки котлована, устройства подземного сооружения и возведения наземной части здания;
- 3) геотехнический мониторинг напряженно-деформированного состояния фундаментов;
- 4) мониторинг конструкций подземной и наземной частей по мере возведения здания.



Рис. 1. Система автоматизированного мониторинга комплекса «Лакhta Центр»
 Fig. 1. Automated monitoring system for the “Lakhta Center”

По окончании строительства четвертый измерительный комплекс был дополнен системой автоматизированной обработки информации и системой контроля механической безопасности, что в совокупности составило пятый измерительный комплекс, позволяющий осуществлять интерактивный мониторинг состояния конструкций на стадии эксплуатации [1].

Принципы интерактивного мониторинга включают в себя возможность сравнения данных мониторинга с прогнозом, обратного анализа результатов мониторинга с использованием компьютерных моделей объекта, возможность корректировки прогноза или принятия на основе проведенного анализа необходимых управленческих решений [2].

Признаками работоспособной системы мониторинга являются: наличие реакции на опасные процессы, адекватная оценка степени опасности, своевременное выявление опасных процессов для обеспечения возможности анализа ситуации специалистами и принятия необходимых мер, наличие формализованной подсистемы принятия управленческих решений. Построение работоспособной системы мониторинга невозможно без введения в систему прогнозируемых величин наблюдаемых параметров; критерием состояния «тревоги» должно являться существенное отклонение показаний от прогнозируемых значений.

Расчеты конструкций и компьютерные модели для определения прогнозируемых значений параметров должны отличаться от расчетов и моделей при проектировании данных конструкций. В отличие от расчетов при проектировании, всегда выполняемых «в запас прочности», расчеты для определения прогнозируемых параметров должны отражать наиболее вероятное состояние рассчитываемой конструкции, компьютерные модели по возможности должны наиболее полно отражать действительную работу конструкций.

Проект геотехнического мониторинга был выполнен в НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»» под руководством О.А. Шулятьева. Институтом ООО «ПИ Геореконструкция» была выполнена работа по геотехническому мониторингу (по первому, второму и третьему измерительным комплексам), а также совместно с компанией «Телрос» организована система интерактивного мониторинга состояния конструкций при эксплуатации (пятый измерительный комплекс).

В рамках первого измерительного комплекса до выемки котлована вокруг ограждения подземной части здания была размещена система инклинометров. Одновременно было установлено геотехническое оборудование второго комплекса, включающее датчики порового давления, марки для измерения послойных осадок основания (экстензометры).

По мере устройства конструкций подземной части здания осуществлялась установка оборудования третьего измерительного комплекса: тензодатчики в сваях, датчики для определения давления под подошвой ростверка, в нижней плите коробчатого фундамента, а далее – четвертого комплекса – в стенах подземных этажей и в верхней плите коробчатого фундамента. При возведении наземных конструкций в ядре жесткости и колоннах устанавливались датчики напряжений.

На этапе эксплуатации была организована система интерактивного мониторинга, интегрированная с системой управления зданиями Лахта Центра.

Контроль горизонтальных смещений «стены в грунте» с помощью инклинометров

Подземная часть башни Лахта-Центра была спроектирована пентагональной в плане. По контуру сооружения устраивалась монолитная «стена в грунте». Для восприятия горизонтальных усилий устраивались «распорные кольца» в виде временных межэтажных перекрытий. Для контроля за горизонтальными смещениями по контуру подземной части была предусмотрена система инклинометров (рис. 2).

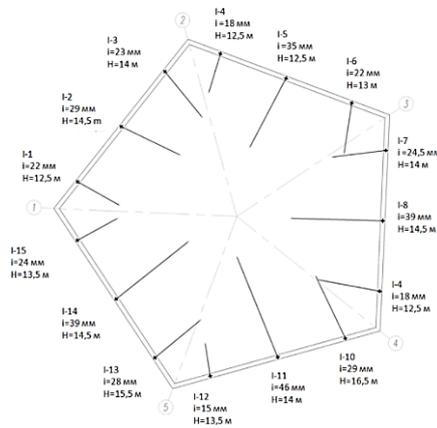


Рис. 2. Схема расположения инклинометров и векторы их максимальных суммарных смещений
 Fig. 2. Inclinometer arrangement and vectors of their maximum total displacement

На основе полученных данных были построены векторы максимальных суммарных смещений инклинометров (рис. 2), начиная с момента выемки котлована в августе 2013 г. до апреля 2015 г., когда было завершено устройство железобетонной плиты днища и перекрытия над нижним подземным этажом. Максимальное суммарное смещение наблюдалось по инклинометру I-11 на глубине 14 м, оно составляло 46,4 мм (рис. 3). Измеренные горизонтальные перемещения не превышали максимальных расчетных значений (76 мм).

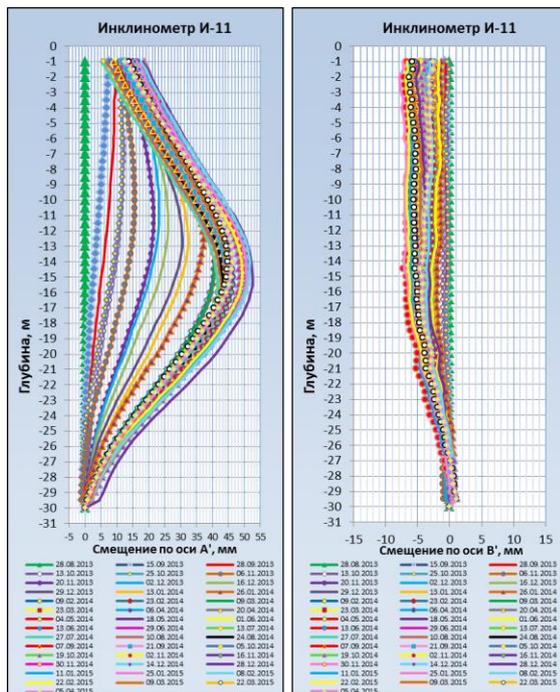


Рис. 3. Горизонтальные смещения «стены в грунте» внутрь котлована по инклинометрам
 Fig. 3. Horizontal displacement of wall in soil inside excavation according to inclinometers

Результаты измерений демонстрируют, что, в отличие от цилиндрической формы подземной части, пентагональное в плане подземное сооружение, безусловно, не позволяет достичь минимальных и при этом одинаковых горизонтальных смещений ограждения котлована. Смещения в более жестких угловых зонах, как и ожидалось, оказались почти вдвое меньше, чем в середине каждой стороны пятиугольника. Однако правильная форма подземного сооружения в плане позволяет все же использовать эффект «бочки с обручами внутри», работающей на наружное давление, и тем самым проводить работы в почти полностью открытом котловане с минимальной зоной работ под перекрытиями контурных распорных «обручей».

Контроль порового давления

Для контроля порового давления в основании сооружения был использован многоуровневый скважинный пьезометр, представляющий собой цепочку преобразователей давления струнного типа, подсоединенных к общему многожильному кабелю. Многожильный кабель обеспечивает возможность независимых измерений порового давления воды на восьми уровнях в скважине. Датчики порового давления снабжены фильтровыми наконечниками с размерами пор 40–50 мкм.

Для наблюдений за изменением порового давления в грунте межсвайного пространства в июне – июле 2013 г. было выполнено бурение и обустройство пяти наблюдательных скважин глубиной 97 м с восемью датчиками в каждой (рис. 4).

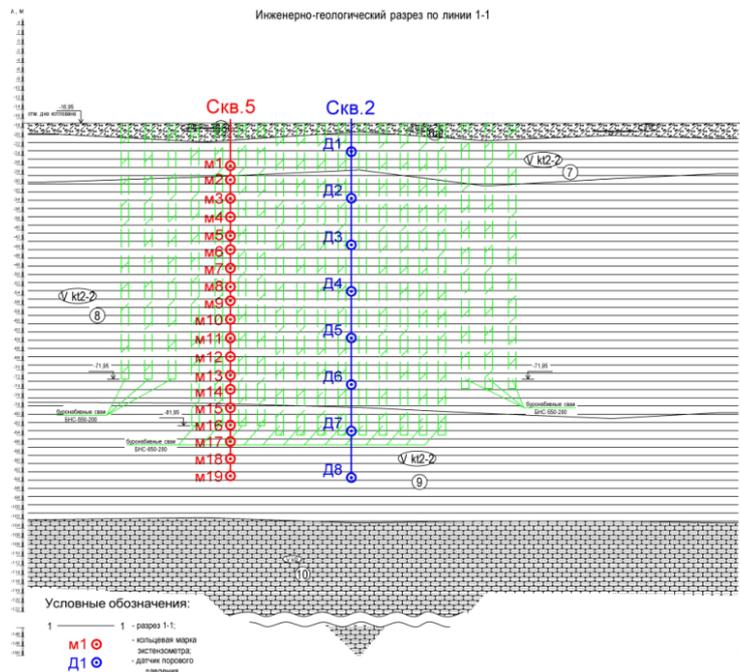


Рис. 4. Расположение экстензометров и вертикалей с датчиками порового давления
Fig. 4. Location of extensometers and verticals with pore pressure sensors

Во всех скважинных пьезометрах были зарегистрированы практически идентичные показания. Для примера на рис. 5 представлены графики показаний датчиков порового давления скважины 2.

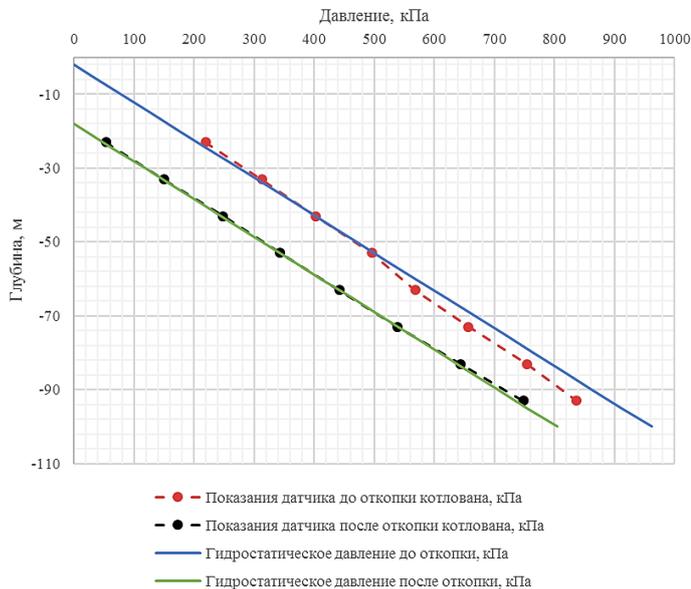


Рис. 5. Показания датчиков порового давления, установленных в скважине № 2
 Fig. 5. Readings of pore pressure sensors installed in well 2

Анализ результатов измерения порового давления показывает, что в начале наблюдений показания датчиков на всех глубинах примерно соответствуют гидростатическому давлению (давлению столба воды) с нулем ориентировочно на уровне Кронштадтского футштока (0 м БСВ), т. е. уровня Финского залива в состоянии покоя. В период устройства подземной части здания показания датчиков в верхней части разреза на глубине 23–35 м падают (с 07.08.2013 по 07.04.2014) в точности на величину снятого при откопке котлована столба воды (15–16 м). По мере возрастания глубины установки датчика это падение снижается (на глубине 83–95 м вдвое). Впоследствии, по мере возведения здания, наблюдается медленный рост показаний датчиков: на 07.12.2015, когда ядро возведено уже на высоту 50 м над землей, прирост показаний еще не достигает исходного гидростатического уровня, что может быть связано с колебаниями уровня воды в Финском заливе.

Показания датчиков порового давления демонстрируют исключительно гидростатическое давление воды, действующее на всей глубине, включая слои отложений венда. Никаких признаков возникновения избыточных поровых давлений не наблюдается.

Измерение послойных деформаций основания

Для наблюдений за послойными осадками основания в июне – июле 2013 г. было выполнено бурение и обустройство пяти наблюдательных скважин глубиной 97 м (см. рис. 4). В каждой скважине было размещено 19 дат-

чиков вертикальных перемещений грунтового массива (кольцевые марки) магнитного многоуровневого скважинного экстензометра. Результаты измерений послойных осадок свайного основания представлены на рис. 6.

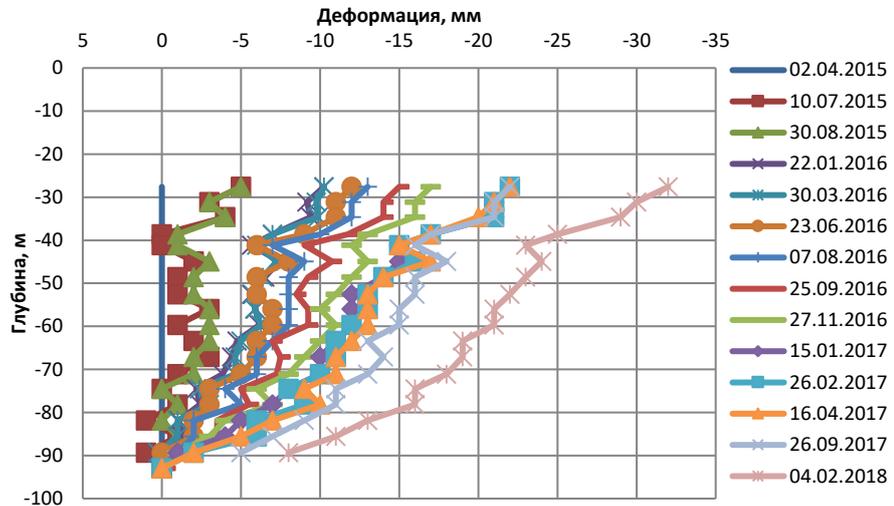


Рис. 6. Эпюры деформаций по экстензометрам
Fig. 6. Strain diagrams from extensometers

Согласно результатам измерений по экстензометрам, осадки высотного здания развивались по возрастающей кривой и достигли к моменту окончания строительства в 2018 г. 32 мм в зоне под ядром. В краевых зонах осадки оказались вдвое меньше. При этом примерно такие же осадки были зафиксированы геодезическими способами, привязанными к фундаментным реперам. Следовательно, можно утверждать, что весьма ограниченный слой грунта претерпевает осадки под пятой сваи.

В развитие осадок внес вклад и эффект сжатия «условного фундамента», состоящего из свай и грунта в межсвайном пространстве. К моменту завершения строительства на сжатие «условного фундамента» приходилось почти 2/3 накопленных осадок. Измеренные величины осадок коррелируют с выполненными авторами монографии [3] результатами расчета длительных осадок здания на нелинейном вязкопластическом основании (с учетом возможного развития длительной ползучести). По результатам расчетов максимальная длительная осадка здания достигнет 8 см при сравнительно небольшой неравномерности осадок. При этом доля ползучести составляет порядка 30 %. Согласно расчетам, в процессе строительства здания должно быть реализовано примерно 3 см осадки, что хорошо согласуется с результатами наблюдений.

Измерение давления под подошвой ростверка

Для наблюдений за давлением под подошвой ростверка была произведена установка 10 датчиков давления (рис. 7). Измерение давления было начато после устройства плиты днища в апреле 2015 г. Результаты измерений представлены на рис. 8.

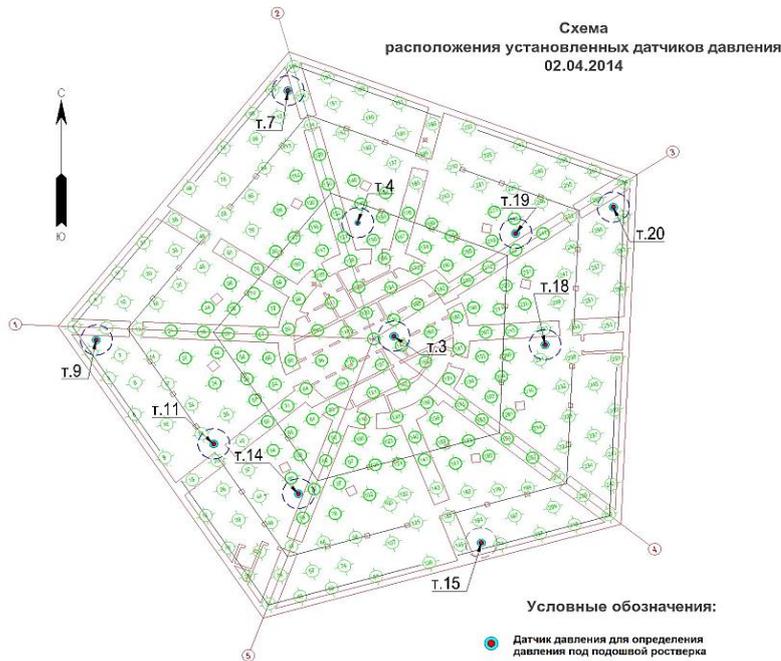


Рис. 7. Схема расположения датчиков для определения давления под подошвой ростверка
 Fig. 7. Schematic diagram of sensors for pressure detection under the foundation footing

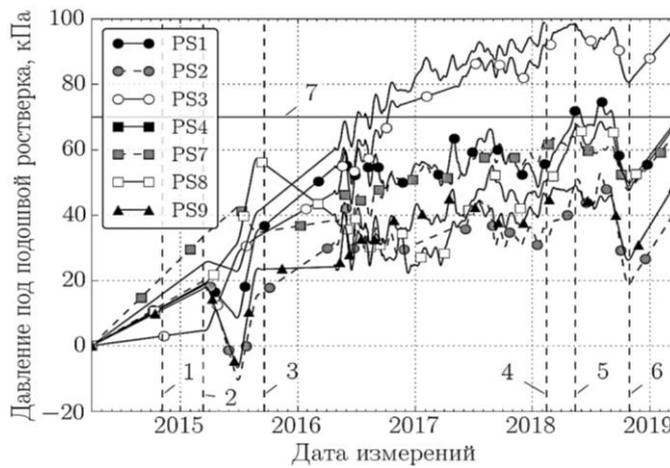


Рис. 8. Графики изменения давления под подошвой ростверка:
 PS1–PS9 – датчики контактного давления под подошвой фундамента (схему расположения см. на рис. 7); 1 – устройство силовой железобетонной подготовки; 2 – начало демонтажа распорной системы; 3 – завершение строительства подземной части; 4 – завершение устройства железобетонных конструкций; 5 – окончание монтажа шпиля; 6 – отделочные работы; 7 – проектная величина контактного давления под подошвой ростверка

Fig. 8. Pressure changes under foundation bottom:
 1 – construction of reinforced concrete bedding; 2 – anchor system dismantling; 3 – underground part; 4 – reinforced concrete structures; 5 – fleche installation; 6 – finishing; 7 – design value of contact pressure. PS1–PS9 are contact pressure sensors

Результаты измерений давления под подошвой ростверка демонстрируют, что контактные давления грунта по подошве ростверка составляют 72,4 кПа, т. е. 16 % от суммарного веса возведенного сооружения. Полученная величина хорошо согласуется с результатами расчетов и общими представлениями о работе свайного фундамента. Таким образом, плита ростверка слабо участвует в работе свайного фундамента. Следовательно, такой фундамент нельзя рассматривать как плитно-свайный, он должен считаться свайным (что совершенно справедливо и было заложено в проектном решении). В данном случае под плитой ростверка залегают моренные отложения, сжимаемость которых существенно выше, чем отложений венда, на которые опираются сваи. Данные результаты подтверждают, что в случае залегания под подошвой плиты существенно более податливого основания, по сравнению с основным несущим слоем свайного основания, предпочтение следует отдавать свайным типам фундаментов.

Мониторинг конструкций фундамента

Для проведения мониторинга зданий Лахта Центра была спроектирована автоматизированная система мониторинга деформационного состояния (СМДС), объединившая системы геотехнического мониторинга, деформаций коробчатого фундамента (КФ), мониторинга высотной части башни, мониторинга конструкций многофункционального здания (МФЗ) и входной Арки [4].

После завершения строительства система мониторинга была интегрирована с системой управления зданием (BMS) с включением ряда измерительных систем (рис. 9), которые будут способствовать безопасной эксплуатации уникальных зданий.

Система мониторинга деформации КФ (рис. 10) – наиболее масштабная и сложная подсистема в составе СМДС – была спроектирована для анализа изменений НДС фундамента. Для комплексного анализа напряженно-деформированного состояния на стержни рабочей арматуры нижней плиты, стен-диафрагм и верхней плиты было установлено в общей сложности 1210 струнных тензометров, объединенных в 196 створов. Каждый створ, в зависимости от типа конструкции и характера её деформирования, включает в себя 2 или 3 измерительных пункта. Измерительные пункты оборудованы парой датчиков, ориентированных во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль рабочих арматурных стержней. Такая конфигурация системы для сравнения с результатами расчета позволила с достаточной точностью определить распределение напряжений по толщине плит и стен КФ.

Проектные решения по размещению датчиков деформации в плитах коробчатого фундамента позволили в процессе возведения детально контролировать и очень подробно изучать напряженно-деформированное состояние этих крайне ответственных элементов конструкций башни (рис. 11).

По результатам измерения деформации были определены напряжения и усилия в трех наиболее нагруженных арматурных сетках нижней плиты и двух сетках верхней плиты, а также напряжения в теле бетона. Путем интегрирования по высоте сечения эпюры нормальных напряжений были вычислены действующие в плитах изгибающие и мембранные усилия, которые сравнили с результатами конечно-элементного моделирования.

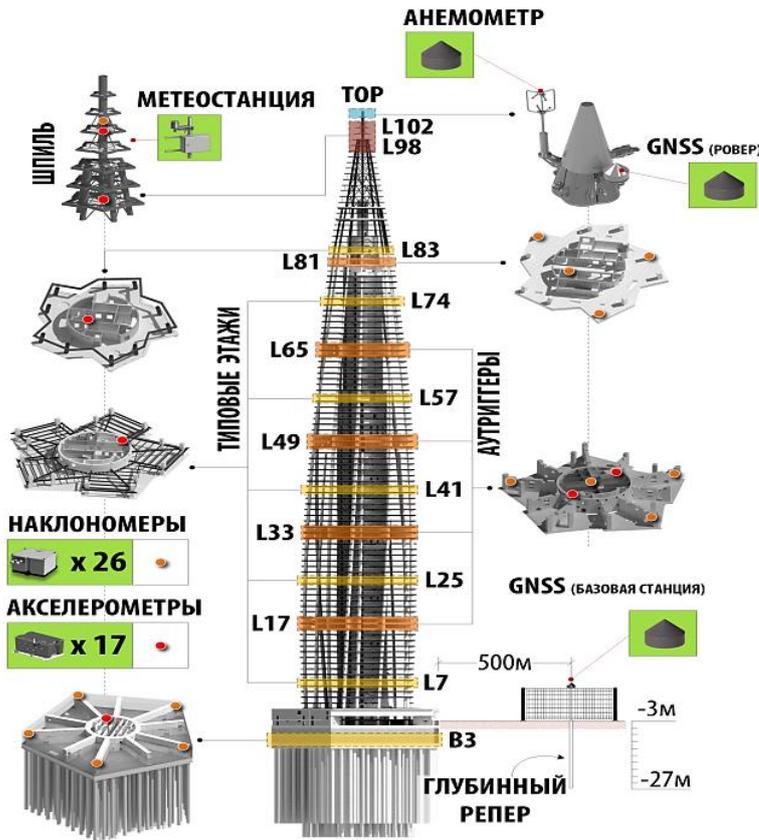


Рис. 9. Состав системы мониторинга
Fig. 9. Monitoring system composition

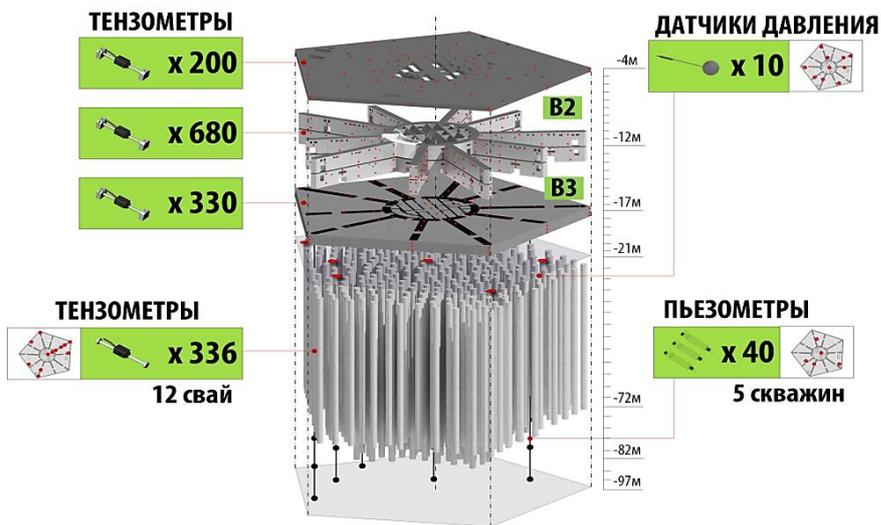


Рис. 10. Система мониторинга деформаций коробчатого фундамента
Fig. 10. Monitoring system of box foundation deformation

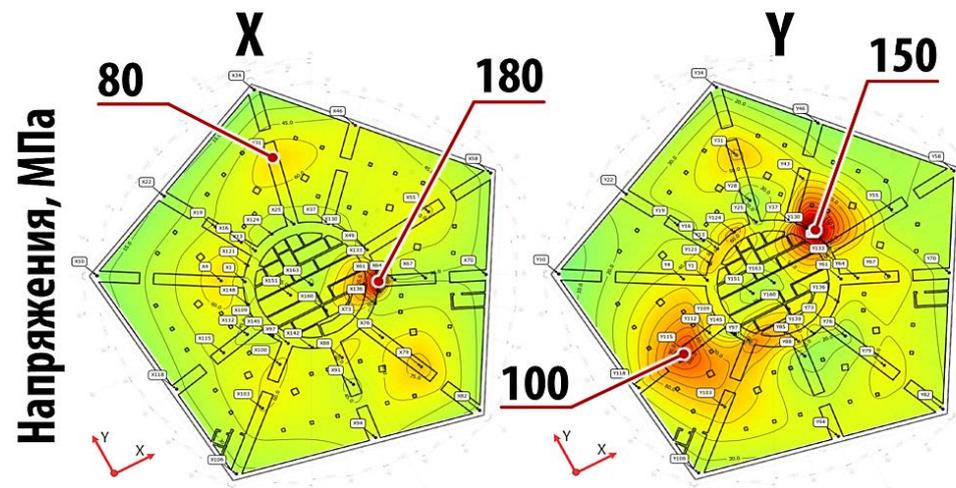


Рис. 11. Изополя напряжений в нижней арматурной сетке нижней плиты
 Fig. 11. Stress isofields in bottom slab reinforcement mesh

Результаты мониторинга нижней плиты КФ показали, что расчетная жесткость основания отличается от реальной, что приводит к различиям в характере распределения усилий по площади плиты. В то же время амплитудные значения усилий отличаются от расчетных незначительно.

Проектные решения по мониторингу деформации нижней плиты КФ позволили определить реальные напряжения в рабочей арматуре. В частности, в наиболее нагруженной нижней арматурной сетке растягивающие напряжения не превышают 80 МПа (см. рис. 11), за исключением небольшого числа локальных концентраций.

Выводы

Дано описание структуры, принципов построения и функционирования автоматизированной системы мониторинга комплекса «Лахта Центр». Приведены и проанализированы результаты геотехнического мониторинга «условного» фундамента, включающего в себя сваи и грунт межсвайного пространства. Представлены данные о напряженно-деформированном состоянии конструкций коробчатого фундамента.

Практический опыт по реализации строительства уникального высотного здания в сложных грунтовых условиях позволил усовершенствовать методики геотехнических расчётов, расчётов конструкций из высокоармированного и высокопрочного железобетона; внедрить современные технологии строительного производства; реализовать на практике идеи и принципы интерактивного мониторинга в периоды строительства и эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Богов С.Г., Лукин В.М. Результаты геотехнического мониторинга при строительстве высотного здания в г. Санкт-Петербурге // Геотехника. 2020. Т. XII. № 3. С. 36–52.

2. *Шашкин К.Г.* Теоретические основы интерактивного мониторинга сложных зданий и подземных сооружений // *Геотехника*. 2018. Т. X. № 3. С. 26–35.
3. *Шашкин А.Г.* Проектирование зданий и подземных сооружений в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Москва : Академическая наука. Геомаркетинг, 2014. 352 с.
4. *Травуш В.И., Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А., Шахворостов А.И., Десяткин М.А., Шулятьев О.А., Шулятьев С.О.* Лахта Центр: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания // *ACADEMIA. Архитектура и строительство*. 2018. № 4. С. 94–108.

REFERENCES

1. *Shashkin A.G., Shashkin K.G., Bogov S.G., Lukin V.M.* Results of geotechnical monitoring during construction of a high-rise building in St.-Petersburg. *Geotechnika*. 2020; 12 (3): 36–52. (In Russian)
2. *Shashkin K.G.* Theoretical foundations of interactive monitoring of complex buildings and underground structures. *Geotechnika*. 2018; 10 (3): 26–35. (In Russian)
3. *Shashkin A.G.* Design of buildings and underground structures in challenging engineering geology conditions in St.-Petersburg. Moscow: Akademicheskaya nauka. Geomarketing, 2014. 352 p. (In Russian)
4. *Travush V.I., Shakhramanyan A.M., Kolotovich Yu.A., Shakhvorostov A.I., Desyatkin M.A., Shulyaev O.A., Shulyaev S.O.* Lakhta Center: Automated monitoring of deformations of load-bearing structures and foundations. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2018; (4): 94–108. (In Russian)

Сведения об авторе

Никифоров Сергей Владимирович, директор по проектированию, АО «Синергия», 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая морская, 24, sergeivnikiforov@gmail.com

Authors Details

Sergey V. Nikiforov, Director for Engineering, AO “Synergy”, 24, Bolshaya Morskaya Str., 190000, Saint-Petersburg, Russia, sergeivnikiforov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.05.2024
Одобрена после рецензирования 30.05.2024
Принята к публикации 31.05.2024

Submitted for publication 13.05.2024
Approved after review 30.05.2024
Accepted for publication 31.05.2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 196–209.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 196–209.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 504.06

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209

EDN: UFMUTP

ВТОРИЧНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУПЕРАЦИОННЫХ БИТУМОВ ИЗ ОТХОДОВ РУЛОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Николай Игоревич Шестаков, Евгения Владимировна Ткач,
Наталья Владимировна Хохлова, Анастасия Юрьевна Приходько**

Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

г. Москва, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Рассматривается проблематика утилизации и вторичного использования битумных компонентов из отходов кровельных материалов, вызванная острой необходимостью минимизации экологического воздействия и экономически эффективного использования природных ресурсов.

Исследование обусловлено существенной ролью битумных материалов в строительной отрасли и проблемами, связанными с их утилизацией после окончания срока службы, включая экологическую угрозу от накопления отходов и утрату первоначальных свойств материалов под воздействием деструктивных факторов, таких как ультрафиолетовое излучение, температурные перепады и влажность.

Цель исследования заключается в оценке эффективности методов рекуперации битума, при которых используются различные органические растворители. В работе особый акцент сделан на химическом методе, характеризующемся применением активных химических компонентов для растворения и извлечения битума, таких как технический керосин, трихлорэтилен, хлороформ и тетрахлорметан. В качестве контрольного образца для сравнения рассматривался битум, извлеченный термическим способом из рубероида без воздействия растворителей.

Методы исследования. Применение органических растворителей оценивалось через анализ полярности и способности растворять определенные группы углеводородов, что позволяло селективно изменять химический состав битума. Проведенные исследования включают методы жидкостно-адсорбционной хроматографии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) для определения изменений в групповом составе и тепловых свойствах битума соответственно.

Результаты показывают, что изменение концентрации углеводородных групп в битуме под воздействием растворителей влияет на физико-химические свойства материала, что открывает перспективы для его повторного использования в производстве строительных и дорожных покрытий. Изменения в тепловом потоке, наблюдаемые при ДСК, позволяют оптимизировать свойства извлеченного битума и повышают эффективность его применения.

Выводы исследования подтверждают возможность интеграции рекуперированных битумных отходов в производственный цикл, что ведет к снижению потребности в первичных ресурсах и уменьшению экологической нагрузки от захоронения отходов, способствуя устойчивому развитию строительной отрасли.

Ключевые слова: рубероид, битум, рекуперация, растворители, групповой состав битума, синхронный термический анализ

Для цитирования: Шестаков Н.И., Ткач Е.В., Хохлова Н.В., Приходько А.Ю. Вторичное применение рекуперационных битумов из отходов рулонных материалов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 196–209. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209. EDN: UFMUTP

ORIGINAL ARTICLE

SECONDARY USE OF RECOVERED BITUMEN FROM WASTE ROLL MATERIALS

**Nikolay I. Shestakov, Evgenia V. Tkach,
Natalia V. Khokhlova, Anastasia Y. Prikhodko**
*National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Abstract. The article discusses current issues of recycling bitumen components from waste roofing materials due to an urgent need to minimize the environmental impact and provide cost-effective use of natural resources. The study is driven by the significant role of bituminous materials in the construction industry and their disposal after the end of their service life, including the environmental threat from waste accumulation and loss of original properties of materials caused by the ultraviolet radiation, temperature changes and humidity.

Purpose: The aim of the work is to evaluate the effectiveness of bitumen recovery methods utilizing various organic solvents. Special emphasis is placed on the chemical method characterized by the use of active chemical components to dissolve and extract bitumen, such as technical kerosene, trichlorethylene, chloroform and carbon tetrachloride. For comparison, a bitumen sample is thermally extracted from roofing felt without exposure to solvents.

Methodology/approach: The analysis of polarity of organic solvents and their ability to dissolve certain groups of hydrocarbons, which made it possible to selectively change the bitumen chemical composition. Liquid adsorption chromatography and differential scanning calorimetry techniques are used to determine changes in the composition and thermal properties of bitumen, respectively.

Research findings: Changes in the concentration of hydrocarbon groups in bitumen under the influence of solvents affect physicochemical properties of the material, that opens up pro-

spects for its reuse in construction and road coating production. Changes in heat flow observed during the DSC analysis, allow optimizing the properties of the extracted bitumen and improve the efficiency of its application.

Practical implications: The possibility is shown for integrating recovered bitumen waste in the production cycle, which leads to a reduction in the need for primary resources and environmental burden from waste disposal, contributing to the sustainable development of the construction industry.

Keywords: bitumen felt, bitumen, recovery, solvent, bitumen composition, simultaneous thermal analysis

For citation: Shestakov N.I., Tkach E.V., Khokhlova N.V., Prikhod'ko A.Yu. Secondary use of recovered bitumen from waste roll materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 196–209. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-196-209. EDN: UFMUTP

В современной строительной практике битумные материалы являются неотъемлемой частью кровельных работ, выбор которых обоснован их превосходными гидроизоляционными свойствами. Тем не менее с окончанием срока службы этих материалов возникает проблема обращения с битумосодержащими строительными отходами [1, 2, 3], которые не подлежат простой утилизации и представляют значительную экологическую опасность [4, 5, 6]. Битумные компоненты кровли в процессе эксплуатации подвергаются воздействию множественных деструктивных факторов, в числе которых ультрафиолетовое излучение, термические колебания и постоянная влажность. Эти условия приводят к деградации физико-химических свойств битума, включая разрыв молекулярных связей [7, 8], что обуславливает снижение его эластичности, механической прочности и гидроизоляционных качеств.

Проблематика кровельных отходов осложняется феноменом многослойности и самих материалов (рис. 1), и состоящих из них кровельных систем, когда новые материалы наслаиваются на старые без их предварительного демонтажа в процессе капитального ремонта или реконструкции зданий. Это приводит к формированию кровель с многослойной структурой, в некоторых случаях включающих до 20 различных слоев, что существенно затрудняет последующую рециклизацию и утилизацию данных отходов [9, 10, 11, 12].

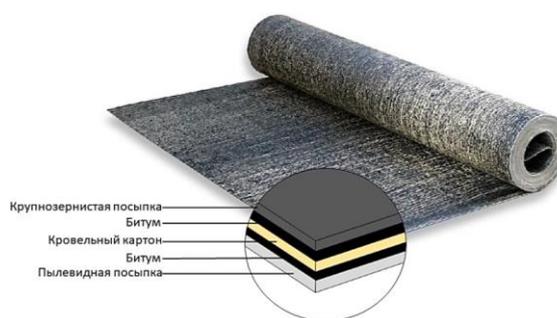


Рис. 1. Схема слоев на примере рубероида РКК-420А

Fig. 1. Layers of RKK-420A roofing material

Согласно ГОСТ 10923–93 «Рубероид. Технические условия», рубероид является многокомпонитным строительным материалом, преимущественно органического происхождения. Состав применяемых материалов изменяется в зависимости от условий эксплуатации и проектных решений. Нормативный состав материалов с указанием массы присутствующего в них битума представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав различных марок рубероида

Table 1

Composition of various roofing materials

Тип рубероида	Марка рубероида	Назначение	Марка картона	Содержание битума, кг/м ²
Кровельный с крупнозернистой посыпкой	РКК-420А	Для верхнего слоя кровельного ковра	А-420	1,2–1,8
	РКК-420Б		Б-420	1,2–1,8
	РКК-350Б		Б-350	1,2–1,8
Кровельный с чешуйчатой посыпкой	РКЧ-350Б		Б-350	1,4–2,0
Кровельный с пылевидной посыпкой	РКП-350А	Для верхнего слоя кровельного ковра с защитным слоем	А-350	1,2–1,6
	РКП-350А		Б-350	1,2–1,6
Подкладочный с пылевидной посыпкой	РПП-300А	Для верхнего слоя кровельного ковра	А-300	1,4–1,8
	РПП-300Б		Б-300	1,4–1,8
Подкладочный эластичный с пылевидной посыпкой	РПЭ-300	Для нижнего слоя кровельного ковра в районах Крайнего Севера	А-300	1,4–1,8

Научные исследования в области переработки битумосодержащих отходов [13, 14, 15, 16, 17] стали активно развиваться во второй половине XX в., когда перед мировым сообществом встали задачи по сохранению природных ресурсов и предотвращению экологических катастроф. В различных странах, в том числе и в России, происходило внедрение разнообразных технологий для решения этой проблемы [18, 19, 20, 21].

Международный опыт показывает [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28], что эффективное решение вопроса лежит через интеграцию переработки отходов в экономику замкнутого цикла. Примером могут служить страны, где приняты строгие нормативы по утилизации строительных отходов. Активно развиваются технологии не только утилизации, но и полного цикла переработки битумных материалов с их последующим возвращением в производство кровельных или дорожных покрытий. Основные направления по переработке и утилизации битумосодержащих кровельных строительных отходов представлены в сводной табл. 2.

Таблица 2

**Методы переработки и утилизации битумосодержащих
кровельных строительных отходов**

Table 2

Methods for processing and disposal of bitumen-containing waste

Метод переработки	Описание	Преимущества	Ограничения
Термическая обработка	Восстановление битума путем нагревания материалов и последующей обработки	Позволяет повторно использовать битум, снижает объем отходов	Требует высоких температур и контроля выбросов
Измельчение и добавление в новые смеси	Измельченные материалы используются как добавка в асфальтобетонные смеси или при производстве новых битумных кровельных материалов	Повторное использование материала как добавки улучшает свойства смесей	Возможное присутствие загрязняющих веществ, требует тщательной очистки
Пиролиз	Разложение материалов при высоких температурах без доступа кислорода	Преобразование отходов в масло, газ и твердые остатки для последующего использования	Необходимость обработки полученных продуктов, высокая стоимость оборудования
Газификация	Превращение отходов в синтез-газ для использования в качестве топлива или в химической промышленности	Получение энергии и химических веществ, снижение объема отходов	Технологически сложный и дорогостоящий процесс
Сжигание	Сжигание отходов для выработки энергии	Выработка энергии, уменьшение объема отходов	Необходимость строгого контроля выбросов
Совместное сжигание	Использование отходов в качестве добавок к топливу в цементных печах	Восстановление энергии, уменьшение использования натурального топлива	Требования к контролю за выбросами, возможные ограничения по составу отходов
Биологическая рекультивация	Применение материалов в процессе рекультивации земель	Восстановление нарушенных территорий, улучшение структуры почвы	Необходимость исследования воздействия на экосистему
Захоронение на полигонах	Захоронение отходов на специализированных полигонах	Изолирование отходов от окружающей среды	Долгосрочные риски загрязнения, ограниченное пространство

Проблематика переработки и утилизации битумосодержащих кровельных отходов в России стоит особенно остро в свете непрерывного роста стро-

ительного сектора и увеличения объемов производимых отходов. Использование современных методов рекуперации и извлечения битума из отходов не только актуально, но и становится необходимостью [29, 30]. Такие методы предоставляют возможность возвращения битума в производственный цикл, способствуя значительной экономии ресурсов и сокращению потребности в добыче нового сырья. Переработка отходов снижает их объем, обеспечивая решение проблемы ограниченного пространства на полигонах и минимизируя экологический ущерб от захоронения.

Активное применение методов рекуперации и извлечения битума из отходов становится не только путем снижения экологической нагрузки, но и стратегическим направлением в строительной отрасли России, способствуя устойчивому развитию и эффективному управлению ресурсами.

Существует несколько различных по своим принципам методов рекуперации, а именно: химический, термический, ультразвуковой и их различные комбинации. Наиболее актуальным является химический способ, характеризующийся воздействием активных химических компонентов, которые могут растворять и извлекать битум из материала.

Для установления степени эффективности данного метода были исследованы различные органические растворители (табл. 3). Контрольный образец (К) – битум, извлеченный механическим способом при нагревании кровельного материала без применения растворителей.

Таблица 3

Исследуемые составы

Table 3

Compositions

Условное обозначение	Состав
К	Контрольный образец
1	Технический керосин КТ-1
2	Трихлорэтилен (C ₂ HCl ₃)
3	Хлороформ (CHCl ₃)
4	Тетрахлорметан (CCl ₄)

Поскольку химические свойства растворителей и битумных компонентов определяются их полярностью, можно предположить, что растворители с разной полярностью будут иметь различную эффективность в извлечении определенных групп углеводородов. Полярные растворители будут более эффективны в растворении полярных компонентов (например, смол и асфальтенов), в то время как неполярные растворители будут лучше растворять неполярные углеводороды (например, парафины).

Для определения степени изменения битумных материалов в процессе рекуперации был проведен анализ их группового химического состава. Групповой химический состав тяжелых нефтепродуктов определялся методом жидкостно-адсорбционной хроматографии с градиентным вытеснением на лабораторной установке «Градиент-М» с детектором теплопроводности.

Сущность метода заключается в ступенчатом градиентно-вытеснительном разделении высококипящих нефтепродуктов на 7 групп с последующей их регистрацией с детектором по теплопроводности (табл. 4).

Таблица 4

Групповой химический состав исследуемых битумов

Table 4

Chemical composition of bitumen

Групповые элементы	К	1	2	3	4
Парафино-нафтеновые углеводороды	12,7	12,6	15,5	10,0	15,4
Ароматика легкая	7,4	7,1	7,1	4,1	4,1
Ароматика средняя	2,1	2	4,1	2,4	0,6
Ароматика тяжелая	7,1	6,9	4,7	7,5	6,3
Смолы бензольные	5,1	6,0	7,3	6,3	7,1
Смолы спирто-бензольные	28,2	28,2	32,5	37,0	34,4
Асфальтены	37,4	37,2	28,8	32,7	32,1
Итого	100	100	100	100	100

Проанализировав полученные результаты определения группового состава, можно выделить группы состава по объединенным признакам.

Парафино-нафтеновые углеводороды являются насыщенными и относительно неполярными. Их увеличение в образце 3 обусловлено более высокой растворимостью ароматических и полярных компонентов битума в хлороформе, что приводит к обогащению оставшегося битума насыщенными углеводородами. Этот же механизм может объяснить увеличение содержания парафино-нафтеновых углеводородов в образце 4, однако эффект менее выражен из-за различий в селективности растворения тетрахлорметана.

Ароматические углеводороды (легкие, средние, тяжелые) имеют различную степень полярности и кипения. Уменьшение их содержания в образцах 3 и 4 является следствием высокой степени растворимости этих компонентов в хлороформе и тетрахлорметане. Эти растворители обладают хорошей способностью растворять ароматические соединения из-за своей полярности и химической совместимости.

Смолы (бензольные и спирто-бензольные) являются высокомолекулярными и полярными компонентами битума. Увеличение их содержания в образцах 3 и 4 связано с удалением других более летучих и растворимых компонентов, что приводит к относительному увеличению концентрации смол. Это также может быть связано с разложением или изменением молекулярной

структуры других компонентов битума под воздействием растворителя, приводящим к образованию смолистых продуктов.

Асфальтены относятся к группе высокомолекулярных полярных компонентов битума. Их уменьшение в образцах, обработанных хлороформом и тетрахлорметаном, указывает на эффективную работу этих растворителей по удалению асфальтовых компонентов в процессе рекуперации.

Общий механизм изменения группового состава битумов может включать следующие факторы и закономерности:

– селективное растворение: различные растворители имеют разную селективность к компонентам битума, что приводит к их различному извлечению и изменению соотношения компонентов в остатке;

– растворение и коагуляцию: некоторые растворители могут изменять межмолекулярные взаимодействия между компонентами битума, приводя к растворению одних и коагуляции других;

– химическую деструкцию и поликонденсацию: взаимодействие с растворителем может вызвать химические реакции, такие как деструкция (разрыв связей) или поликонденсация (образование новых связей), изменяющие групповой состав битума;

– изменение фазового состояния: под воздействием растворителей могут происходить фазовые переходы, например из твердого в жидкое состояние, что также влияет на растворимость различных компонентов.

Для каждого растворителя, отражая его химические свойства, механизмы взаимодействия с битумом будут различаться. Например, хлорированные растворители более эффективны для полярных и ароматических компонентов из-за их способности к донорно-акцепторным взаимодействиям и высокой полярности.

Таким образом, применение различных органических растворителей для рекуперации битумов из рубероида приводит к селективному извлечению и изменению концентрации определенных групп углеводов в зависимости от их полярности и молекулярной массы. Это изменение в концентрации компонентов влияет на физико-химические свойства извлеченного битума и может быть оптимизировано для получения материалов с желаемыми характеристиками.

Для подтверждения предложенной концепции, а также для анализа температурных переходов и химических реакций в битумах была выполнена дифференциальная сканирующая калориметрия (рис. 2). Это метод анализа, который позволяет изучать тепловые свойства материалов, такие как температуры стеклования, плавления, кристаллизации, а также теплота реакций. В контексте битумов ДСК подходит для изучения термических процессов, происходящих при нагреве, включая разложение или перераспределение компонентов в зависимости от их термической стабильности.

Для выявления пиков теплового потока использовались методы определения локальных максимумов с учетом их выраженности. Таким образом были идентифицированы температурные точки, соответствующие значимым термическим событиям в образцах. Полученные результаты обобщены с дополнительными характеристиками тепловых потоков и представлены в табл. 5.

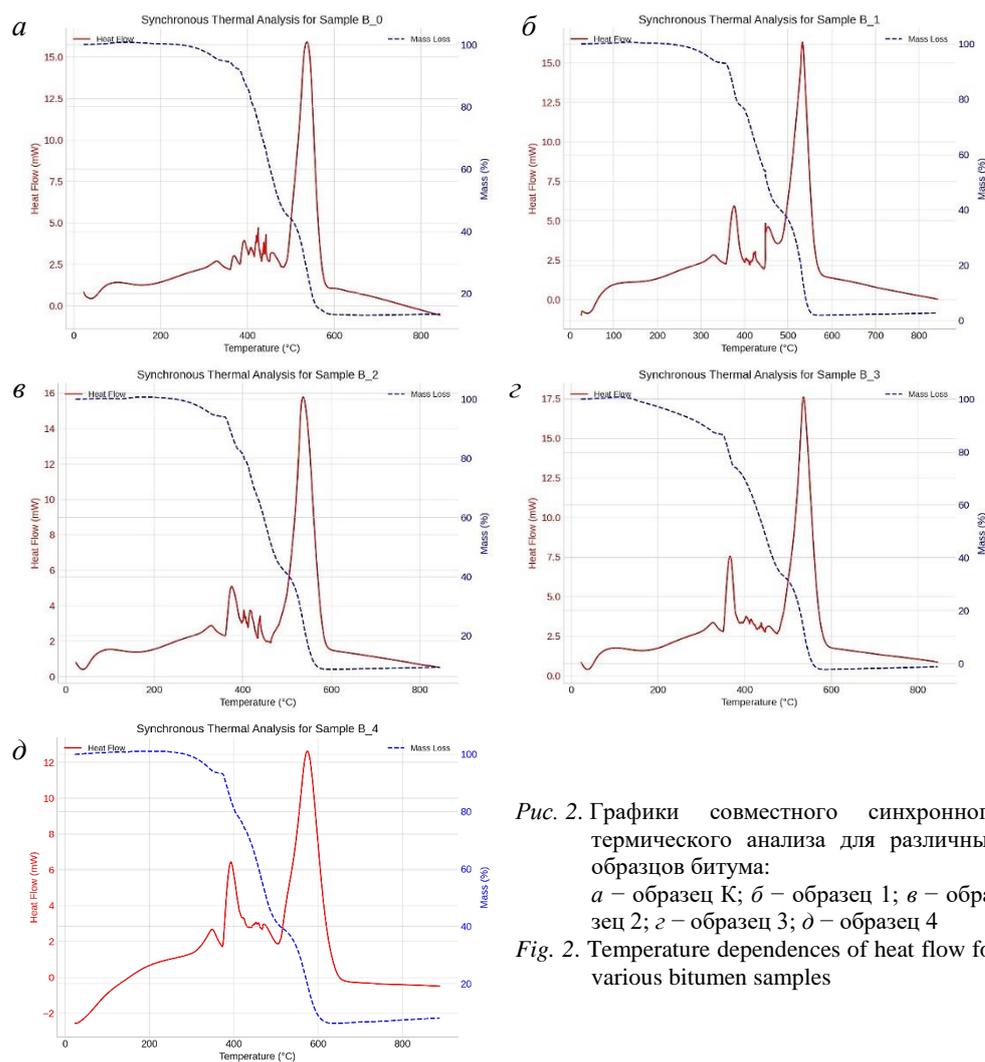


Рис. 2. Графики совместного синхронного термического анализа для различных образцов битума:

a – образец К; *б* – образец 1; *в* – образец 2; *г* – образец 3; *д* – образец 4

Fig. 2. Temperature dependences of heat flow for various bitumen samples

Таблица 5

Характеристики пиков теплового потока исследуемых составов битумов

Table 5

Heat flow peaks of bitumen compositions

Образец	Пик	Температура пика, °С	Тепловой поток, мВт	Потеря массы, %
К	1	392,52	3,941	88,31
	2	424,87	4,712	75,24
	3	442,82	4,300	66,08
	4	536,82	15,904	27,48
1	1	375,94	5,948	83,18
	2	424,37	3,069	64,32
	3	447,68	4,852	53,05
	4	532,63	16,320	15,49

Окончание табл. 5
End of table 5

Образец	Пик	Температура пика, °С	Тепловой поток, мВт	Потеря массы, %
2	1	375,09	5,090	88,05
	2	417,12	3,745	74,51
	3	439,37	3,432	64,33
	4	536,46	15,769	24,52
3	1	366,21	7,543	78,23
	2	535,72	17,601	13,21
4	1	348,62	2,674	94,23
	2	393,16	6,440	83,93
	3	574,27	12,629	19,83

Воздействие растворителей на битумные материалы меняет их групповой состав, что влияет на термическое поведение материала. Растворители могут вымывать или изменять концентрацию определенных компонентов, приводя к изменениям в тепловом потоке, наблюдаемым при ДСК-анализе.

Выводы

Проведенные эксперименты показывают эффективность применения органических растворителей для рекуперации битума из отходов кровельных материалов. Исследования различных растворителей позволили установить, что их химические свойства, в частности полярность, имеют решающее значение в извлечении определенных групп углеводов, что приводит к изменениям в групповом химическом составе битума и его физико-химических свойств.

Выявлено, что полярные растворители эффективнее воздействуют на полярные компоненты битума, такие как смолы и асфальтены, в то время как неполярные лучше растворяют неполярные углеводороды, например парафины. Это позволяет селективно управлять составом рекуперированного битума для достижения требуемых характеристик материала.

Анализ группового химического состава позволил детально оценить изменения в составе битума после обработки различными растворителями. Дополнительно, для изучения тепловых свойств битума, была использована дифференциальная сканирующая калориметрия, которая позволила выявить температурные точки, соответствующие значимым термическим событиям в образцах.

Эксперименты подтвердили, что воздействие растворителей может вызывать вымывание или изменение концентрации определенных компонентов битума, что наблюдается как изменение в тепловом потоке при ДСК-анализе. Такие данные указывают на возможность контролируемой модификации химического состава битума для получения материалов с заданными свойствами.

Результаты исследования подчеркивают потенциал рекуперации битума из отходов для его последующего использования, что способствует сокращению потребности в новом сырье, минимизации отходов, уменьшению экологической нагрузки и содействует устойчивому развитию строительной отрасли.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антонова И.И., Массарова Г.И. Утилизация отходов гидроизоляционных материалов на основе битума // Наследие В.И. Вернадского и современные проблемы экологии. 2023. Т. 1 (1). С. 179–182.
2. Красновских М.П. Перспективы термохимической утилизации многокомпонентных и загрязненных полимерных отходов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2023. № 3. С. 50–58.
3. Мифтахов М.Н. Проблема утилизации битумных отходов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. № 1 (74). С. 14–22.
4. Сагдеева Г.С., Патракова Г.Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 17 (6). С. 194–198.
5. Ермолаев Д.В., Мингалеева Г.Р. Механизм термического разложения асфальтенов природных битумов // Вестник Технологического университета. 2015. № 18 (12). С. 27–31.
6. Пискунов И.В., Белоконь Н.Ю., Глаголева О.Ф. Получение битумов из продуктов вторичных процессов – остатков процессов висбрекинга и деасфальтизации // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2021. № 2 (303). С. 83–95.
7. Пискунов И.В., Белоконь Н.Ю., Глаголева О.Ф. Производство битумных материалов из нефтяных остатков и вторичных ресурсов // Нефть. Газ. Новации. 2021. № 6. С. 67–71.
8. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications // American Journal of Environmental Sciences. 2013. P. 94–24.
9. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery, and secondary fuels production // Renewable Energy. 2018. № 124. P. 180–188.
10. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An overview on alternative binders for flexible pavement // Construction and Building Materials. 2015. № 84. P. 315–319.
11. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement // Scientific World Journal. 2014. DOI: 10.1155/2014/214612
12. Garcia J., Hansen K. HMA Mix Type Selection Guide. Information Series 128. National Asphalt Pavement Association: Lanham MD, USA, 2001.
13. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber // Progress in Polymer Science. 2000. № 25 (7). P. 909–948.
14. Merdrignac I., Espinat D. Physicochemical characterization of petroleum fractions: the state of the art // Oil and Gas Science and Technology. 2007. № 62 (1). P. 7–32.
15. Claudy P., Letoffe J.M., King G.N., Planche J.P., Brule B. Characterization of paving asphalts by Differential Scanning Calorimetry // Fuel Science and Technology International. 1991. № 9 (1). P. 71–92.
16. Карпов Г.Н. Кровельным отходам необходима промышленная переработка // Вестник ОГУ. 2003. № 5. С. 144–147.
17. Халиуллина Л.Э. Вторичное использование отходов кровельных материалов // Достижения науки и образования. 2018. № 17(39). С. 9–11.
18. Асадуллина З.У., Исмаилов С.А., Яковлев В.В. Техничко-экономические и экологические преимущества природоохранной технологии // Башкирский химический журнал. 2012. № 2. С. 74–77.
19. Шеповалов П.П., Штыка О., Елубай М.А. Применение тяжелоутилизируемых отходов во время производства строительных материалов // Наука и техника Казахстана. 2022. № 3. С. 160–167.
20. Дронов С.В., Гаджиева А.Х. Применение кровельных битумсодержащих отходов в производстве битумных композиционных материалов // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2019. № 49 (75). С. 36–39.

21. Шашмаркина А.Е., Сахибгареев И.Р., Каюкова Г.П., Романов Г.В. Техногенные нефтяные образования в окружающей среде – дополнительный источник углеводородного сырья // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 9. С. 208–213.
22. Walker I.D., Colwell R.R., Petrakis L. The rate of micrological degradation of components of crude oils // Canadian Journal of Microbiology. 1976. № 22 (8). P. 1209–1213.
23. Medeiros P.M., Bicego M.C. Investigation of natural and anthropogenic hydrocarbon inputs in sediments using geochemical markers // Marine Pollution Bulletin. 2004. № 49. P. 892–899.
24. Moldovov J.M. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products // Energy Fuels. 1995. № 9. P. 155–162.
25. Chainea C.H., Morel J.L., Oudot J. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil // Journal of Environmental Quality. 1996. № 25 (4). P. 858–867.
26. Шевцов С.А., Каргашилов Д.В., Животягин И.А. Экологически чистая пожаробезопасная и энергоэффективная технология переработки битумсодержащих отходов // Экология промышленного производства. 2020. № 1. С. 2–5.
27. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Shutkin A.N. Fire and explosion safe technology of storage and regasification of liquefied petroleum gas // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. № 54 (1–2). P. 38–40.
28. Radeef H.R., Hassan N.A., Abidin A.R. Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste // Frontiers in Materials. 2021. № 8. P. 1–14.
29. Шестаков Н.И., Чертец К.Л., Хохлова Н.В., Урханова Л.А. Биопозитивные технологии обращения с битумосодержащими строительными отходами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 9 (765). P. 27–38.
30. Хохлова Н.В., Шестаков Н.И., Федосов С.В., Тутова И.И., Сячинова Н.В. Особенности изменения битума в процессе рекуперации // Строительные материалы. 2023. № 7. P. 67–72.

REFERENCES

1. Antonova I.I., Massarova G.I. Disposal of waste waterproofing materials based on bitumen. *Nasledie V.I. Vernadskogo i sovremennye problemy ekologii*. 2023; 1 (1):179–182. (In Russian)
2. Krasnovskikh M.P. Prospects for thermochemical recycling of multicomponent and contaminated polymer waste. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2023; (3): 50–58. (In Russian)
3. Miftakhov M.N. The problem of recycling bitumen waste. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*. 2017; 1 (74): 14–22. (In Russian)
4. Sagdeeva G.S., Patrakova G.R. Recycling industrial and consumer waste using their resource potential. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014; 17 (6): 194–198. (In Russian)
5. Ermolaev D.V., Mingaleeva G.R. Thermal decomposition of asphaltenes in natural bitumen. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*. 2015; 18 (12): 27–31. (In Russian)
6. Piskunov I.V., Belokon N.Yu., Glagoleva O.F. Bitumen production from residues of visbreaking and deasphalting processes. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina*. 2021; 2 (303): 83–95. (In Russian)
7. Piskunov I.V., Belokon N.Yu., Glagoleva O.F. Production of bituminous materials from oil residues and secondary resources. *Neft'. Gaz. Novatsii*. 2021; (6): 67–71. (In Russian)
8. Bolden J., Abu-Lebdeh T., Fini E. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Sciences*. 2013; 9: 4–24.
9. Cremiato R., Mastellone M.L., Tagliaferri C., Zaccariello L., Lettieri P. Environmental impact of municipal solid waste management using Life Cycle Assessment: The effect of anaerobic digestion, materials recovery, and secondary fuels production. *Renewable Energy*. 2018; 124: 180–188.
10. Aziz M.M.A., Rahman M.T., Hainin M.R., Bakar W.A. An overview on alternative binders for flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2015; 84: 315–319.
11. Mashaan N.S., Ali A.H., Karim M.R., Abdelaziz M. A review on using crumb rubber in reinforcement of asphalt pavement. *Scientific World Journal*. 2014; doi:10.1155/2014/214612
12. Garcia J., Hansen K. HMA Mix Type Selection Guide. Information Series 128. National Asphalt Pavement Association: Lanham MD, USA, 2001.

13. Adhikari B., De D., Maiti S. Reclamation and recycling of waste rubber. *Progress in Polymer Science*. 2000; 25 (7): 909–948.
14. Merdrignac I., Espinat D. Physicochemical characterization of petroleum fractions: the state of the art. *Oil and Gas Science and Technology*. 2007; 62 (1): 7–32.
15. Claudy P., Letoffe J. M., King G.N., Planche J.P., Brule B. Characterization of paving asphalts by Differential Scanning Calorimetry. *Fuel Science and Technology International*. 1991; 9 (1): 71–92.
16. Karpov G.N. Roofing waste requires industrial processing. *Vestnik OGU*. 2003; (5): 144–147. (In Russian)
17. Khaliulina L.E. Recycling of waste roofing materials. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya*. 2018; 17 (39): 9–11. (In Russian)
18. Asadullina Z.U., Ismagilov S.A., Yakovlev V.V. Technical, economic and environmental advantages of environmental technology. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal*. 2012; (2): 74–77. (In Russian)
19. Shepvalov P.P., Shtyka O., Elubay M.A. Application of heavily recyclable waste during construction material production. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2022; (3): 160–167. (In Russian)
20. Dronov S.V., Gadzhieva A.Kh. Application of roofing bitumen-containing waste in the production of bitumen composite materials. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta*. 2019; 49 (75): 36–39. (In Russian)
21. Shashmarkina A.E., Sakhibgareev I.R., Kayukova G.P., Romanov G.V. Technogenic oil formations in the environment as additional source of hydrocarbon raw materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011; (9): 208–213. (In Russian)
22. Walker I.D., Colwell R.R., Petrakis L. The rate of micrological degradation of components of crude oils. *Canadian Journal of Microbiology*. 1976; 22 (8): 1209–1213.
23. Medeiros P.M., Bicego M.C. Investigation of natural and anthropogenic hydrocarbon inputs in sediments using geochemical markers. *Marine Pollution Bulletin*. 2004; (49): 892–899.
24. Moldovan J.M. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery by-products. *Energy Fuels*. 1995; (9): 155–162.
25. Chainea C.H., Morel J.L., Oudot J. Land treatment of oil-based drill cuttings in an agricultural soil. *Journal of Environmental Quality*. 1996; 25 (4): 858–867.
26. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Zhivotyagin I.A. Environmentally friendly, fireproof and energy-efficient technology for processing bitumen-containing waste. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2020; (1): 2–5. (In Russian)
27. Shevtsov S.A., Kargashilov D.V., Shutkin A.N. Fire and explosion safe technology of storage and regasification of liquefied petroleum gas. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018; 54 (1–2): 38–40.
28. Radeef H.R., Hassan N.A., Abidin A.R. Enhanced dry process method for modified asphalt containing plastic waste. *Frontiers in Materials*. 2021; 8: 1–14.
29. Shestakov N.I., Chertes K.L., Khokhlova N.V., Urkhanova L.A. Biopositive technologies for handling bitumen-containing construction waste. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 9 (765): 27–38. (In Russian)
30. Khokhlova N.V., Shestakov N.I., Fedosov S.V., Titova I.I., Syachinova N.V. Features of changes in bitumen during the recovery process. *Stroitel'nye materialy*. 2023. (7): 67–72. (In Russian)

Сведения об авторах

Николай Игоревич Шестаков, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, SHestakovNI@mgso.ru

Евгения Владимировна Ткач, докт. техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, ev_tkach@mail.ru

Наталья Владимировна Хохлова, аспирант, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Natalyahoh@bk.ru

Анастасия Юрьевна Приходько, бакалавр, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, 23nastyaa@mail.ru

Authors Details

Nikolay I. Shestakov, PhD, A/Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, SHestakovNI@mgsu.ru

Evgenia V. Tkach, DSc, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, ev_tkach@mail.ru

Natalya V. Khokhlova, Research Assistant, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, Natalyahoh@bk.ru

Anastasia Yu. Prikhodko, Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, 23nastyaa@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.02.2024
Одобрена после рецензирования 28.02.2024
Принята к публикации 22.04.2024

Submitted for publication 09.02.2024
Approved after review 28.02.2024
Accepted for publication 22.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 210–218.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 210–218.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.11–674.02:533.924

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218

EDN: JHCGOJ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ С УЧЕТОМ ИХ СЕБЕСТОИМОСТИ

**Геннадий Георгиевич Волокитин, Мария Владимировна Устинова,
Владимир Алексеевич Черемных**

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* В настоящее время вопрос создания новых и модификации существующих строительных материалов с целью улучшения их физико-механических и эксплуатационных свойств является весьма актуальным. Древесина – один из распространенных строительных материалов. Для увеличения срока службы конструкций и изделий из древесины необходимо предусмотреть ее защитную обработку от неблагоприятных факторов. Наиболее экологичным типом обработки является термическая. В качестве альтернативы термической модификации в среде разогретого пара или газа, а также обжига древесины предлагается использовать обработку поверхности древесины потоком низкотемпературной плазмы. Для определения возможности применения данного вида обработки необходимо установить влияние воздействия плазменным потоком на механические свойства древесины. Также важным вопросом, сдерживающим применение данного метода, является его себестоимость.

Цель работы – выявление влияния обработки древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы и газозвушной горелкой на предел прочности при сжатии, а также определение и сравнение себестоимости данных видов обработки.

Результаты. В работе представлены результаты определения предела прочности при сжатии вдоль волокон для необработанных образцов из сосны в потоке низкотемпературной плазмы и обработанных с помощью газозвушной горелки. Установлено, что как плазменная обработка, так и обработка горелкой не оказывают влияния на предел прочности при сжатии. Также определено, что стоимость обработки поверхности древесины потоком низкотемпературной плазмы значительно ниже стоимости обработки газозвушной горелкой. Сравнительно низкая стоимость плазменной обработки обеспечивается высокой производительностью процесса, которая, в свою очередь, достигается благодаря значительной величине удельных тепловых потоков.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, древесина, себестоимость, плазменная обработка, газовая горелка

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2023-0003).

Для цитирования: Волокитин Г.Г., Устинова М.В., Черемных В.А. Определение влияния различных видов термической обработки на механические свойства древесины сосны с учетом их себестоимости // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 210–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218. EDN: JHCGOJ

ORIGINAL ARTICLE

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES OF PINE WOOD WITH REGARD TO PRIME COST

Gennady G. Volokitin, Maria V. Ustinova, Vladimir A. Cheremnykh
Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Currently, it is relevant to create new and modify existing building materials in order to improve their physical, mechanical and operational properties. Wood is one of the common building materials. In order to improve the service life of wooden structures and products, it is necessary to protect them from negative factors. The most eco-friendly is thermal treatment. As an alternative to thermal modification in the hot steam/gas environment and wood burning, it is proposed to use the surface treatment with low-temperature plasma. To determine the possibility of using this type of treatment, it is necessary to study the plasma flow effect on mechanical properties of wood. However, its prime cost restricts the application of this method.

The paper presents results of compressive strength testing along the fiber for pine samples before and after the treatment with low-temperature plasma and gas burner. Both methods have no effect on the compressive strength. It is shown that the treatment cost is significantly lower than that with the gas burner. Comparatively low cost of the plasma treatment is provided by the high process performance, which, in turn, is achieved through a significant value of specific heat flows.

Keywords: low-temperature plasma, wood, prime cost, plasma treatment, gas burner

Funding: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FEMN-2023-0003).

For citation: Volokitin G.G., Ustinova M.V., Cheremnykh V.A. Influence of thermal treatment on mechanical properties of pine wood with regard to prime cost. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 210–218. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218. EDN: JHCGOJ

Введение

Древесина – органический материал растительного происхождения, имеющий широкий спектр применения [1]. Одной из областей использования древесины является ее применение в качестве строительного или отделочного материала [2, 3]. Спрос на древесину обуславливается экологичностью, выполняемостью и механическими характеристиками данного материала [4, 5, 6]. Вместе с тем на свойства древесины значительное влияние оказывает влажность. Кроме того, возможно образование плесени на поверхности изделий или их загнивание с дальнейшим снижением несущей способности конструкции или ее разрушением [7, 8, 9]. Учитывая эти особенности, необходи-

мо предусмотреть защиту древесины от неблагоприятных факторов. Известными методами защиты древесины являются ее термическая модификация и обжиг поверхности [10, 11]. Обжиг, как правило, осуществляют с использованием газоздушных горелок. При термической модификации древесина выдерживается в среде разогретого пара или газа. Такие виды термической обработки приводят к удалению грибков с поверхности древесины, поскольку температура обработки превышает их жизнеспособную температуру, а также к разложению питательной для грибков среды [12]. Однако описанные методы имеют недостатки в виде низкой производительности и высокой стоимости обработки, кроме того, термическая модификация приводит к снижению прочности древесины [13]. В качестве альтернативного метода термической обработки древесины предлагается использование энергии низкотемпературной плазмы [14].

Обработка поверхности древесины потоком низкотемпературной плазмы приводит к изменению цветовой гаммы поверхности (рис. 1), снижению водопроницаемости за счет закупоривания пор смолами и продуктами горения, а также снижению шероховатости поверхности [15]. Термическое воздействие плазменного потока позволяет уничтожить разрушающие древесину микроорганизмы на глубине до 5 мм (рис. 2), поскольку на такой глубине достигается неблагоприятная для микроорганизмов температура [12, 16, 17].



Рис. 1. Фотография образцов из древесины сосны:

a – до обработки (исходная); *б* – после обработки потоком низкотемпературной плазмы

Fig. 1. Pine wood samples:

a – before low-temperature plasma treatment; *b* – after low-temperature plasma treatment

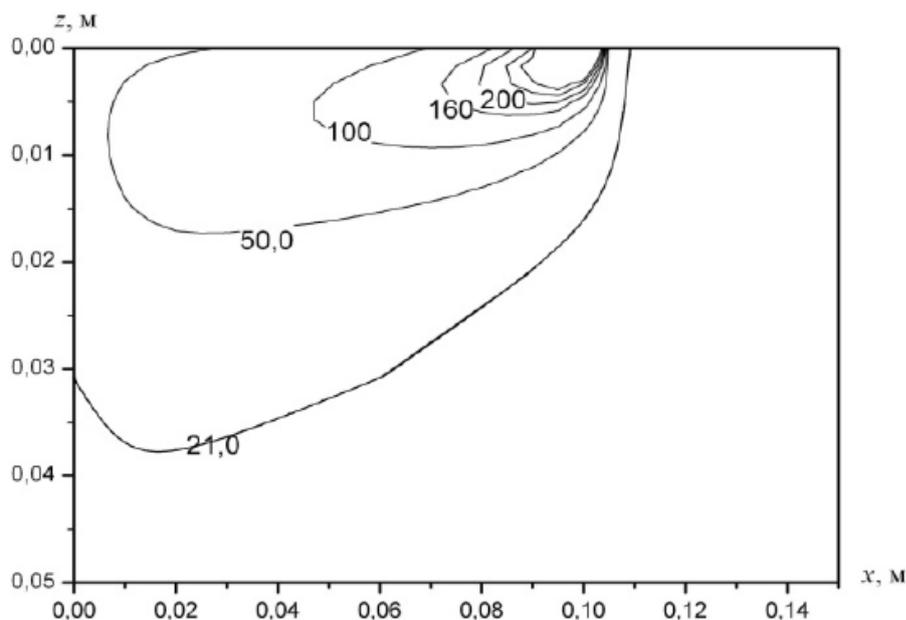


Рис. 2. Температурное поле в момент времени 0,5 с [16]
 Fig. 2. Temperature field at 0.5 s [16]

Целью работы является определение влияния обработки древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы и газозвушной горелкой на предел прочности при сжатии, а также расчет и сравнение себестоимости данных видов обработки.

Материалы и методы исследования

Для определения предела прочности при сжатии вдоль волокон были изготовлены образцы размером 20×20×30 мм по ГОСТ 16483.10–73 из сосны Томской области. Рассматривались исходные образцы, обработанные потоком низкотемпературной плазмы и газовой горелкой.

Для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы использовалось устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы [14] с плазменным генератором косвенного действия ВПР–410 мощностью 18,8 кВт, с величиной удельного теплового потока, равной $1,0 \cdot 10^6$ Вт/м². В качестве плазмообразующего газа применялся сжатый воздух, расход которого составлял 3 м³/ч. Подача сжатого воздуха осуществлялась воздушным компрессором. Для охлаждения плазменного генератора использовалась кольцевая система, состоящая из емкости объемом 10 м³, водяного насоса и шлангов. Система охлаждения заполнялась водопроводной водой. Давление воды в системе охлаждения составляло $3,0 \cdot 10^5$ Па.

Для обработки обжигом применялась горелка газозвушная с номинальной тепловой мощностью 58 кВт и величиной удельного теплового потока, равной $0,45 \cdot 10^6$ Вт/м². Для работы использовался сжиженный газ. Расход газа составлял 6,7 л/ч. Цена газа принималась равной 20 руб. за литр.

Механические испытания на сжатие образцов проводились на испытательной машине INSTRON 3382. Скорость перемещения нагружающей головки испытательной машины принята в соответствии с ГОСТ 16483.10–73 – 4 мм/мин.

Расчет себестоимости проводился на примере обработки 1 м² доски из сосны размером 20×120×2500 мм и влажностью 12 %. Производительность обработки потоком плазмы составляла 27 м²/ч. Производительность обжига горелкой определялась экспериментально для достижения схожих с плазменной обработкой характеристик покрытий на древесных изделиях и составляла 12,2 м²/ч.

На рис. 3 представлены деформационные кривые в координатах «напряжение – деформация», построенные по результатам испытаний образцов из сосны на испытательной машине INSTRON 3382.

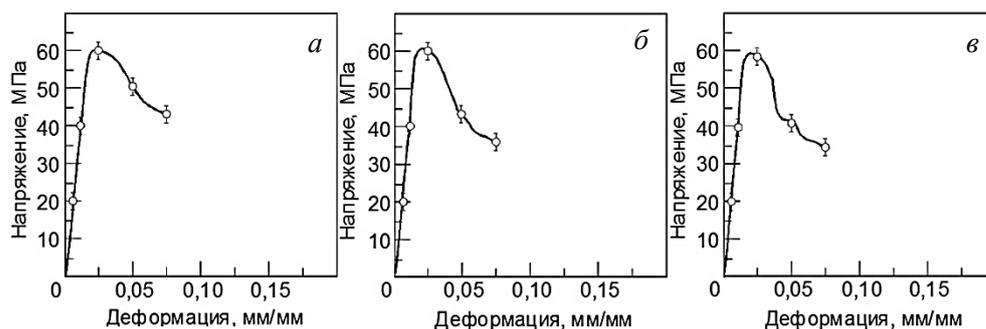


Рис. 3. Графики зависимости деформации от напряжения для образцов, изготовленных из сосны:

a – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Fig. 3. Strain–stress curves for pine samples:

a – untreated; *b* – treated with a gas burner; *c* – treated with plasma

Результаты статистической обработки деформационных кривых из каждой серии образцов из сосны представлены в табл. 1. Установлено, что как обработка древесины потоком низкотемпературной плазмы, так и обработка горелкой не оказывают влияния на предел прочности при сжатии вдоль волокон. Такой результат связан с малым временем воздействия на поверхность древесины.

Таблица 1

Механические характеристики образцов из сосны

Table 1

Mechanical characteristics of pine samples

Вид обработки образцов	Модуль упругости, МПа	ϵ_b , мм/мм	$\sigma_{шц}$, МПа	σ_b , МПа
Необработанные	4540 ± 330	0,017 ± 0,003	43 ± 2	60 ± 3
Плазменная	4498 ± 330	0,017 ± 0,003	44 ± 2	59 ± 3
Газовой горелкой	4505 ± 330	0,017 ± 0,003	43 ± 2	61 ± 3

Результаты расчета себестоимости готовой продукции – древесины, прошедшей термическую обработку потоком низкотемпературной плазмы и газоздушнoй горелкой, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет себестоимости термически обработанной древесины

Table 2

Cost calculation of wood after plasma treatment

Статья затрат	Сумма, руб. за 1 м ² изделия	
	Плазменная обработка	Обработка газовой горелкой
Основные материалы (доски из сосны)	342	342
Оборудование и расходные материалы	3,25	0,18
Аренда помещения	6,94	15,37
Коммунальные платежи	4,90	13,55
Транспортные расходы	2,71	5,68
Заработная плата с налоговыми отчислениями	10,53	23,31
Накладные расходы	5,66	11,62
Итого: полная себестоимость	375,99	411,71
Себестоимость обработки без учета материала	33,99	69,71

После проведения анализа полученных результатов установлено: несмотря на высокую стоимость оборудования для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы, себестоимость 1 м² обработанного изделия выше при использовании газовой горелки. Такой результат связан с относительно низкой производительностью обработки газовой горелкой, что отражается на следующих статьях: аренда помещения, коммунальные платежи и заработная плата.

Заключение

Таким образом, в результате исследования установлено, что обработка поверхности древесины потоком низкотемпературной плазмы, как и газовой горелкой, не оказывает влияния на предел прочности при сжатии образцов из сосны. Это свидетельствует о возможности применения древесины после плазменной обработки в качестве конструкционного материала.

Себестоимость термической обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на 51 % ниже, чем при обработке газовой горелкой. Такой эффект связан с производительностью процесса обработки. Сравнительно высокая производительность плазменной обработки обеспечивается большей величиной удельного теплового потока. Повышение производительности обработки газоздушнoй горелкой возможно при увеличении количества горелок, однако это приведет к росту таких статей затрат, как оборудование, расходные материалы и коммунальные платежи, и не даст значительного эффекта снижения себестоимости обработки.

Кроме того, стоит отметить, что низкие удельные тепловые потоки при обработке газозвоздушной горелкой не смогут обеспечить уничтожения грибковых заболеваний древесины на глубине до 5 мм.

Таким образом, обработка потоком низкотемпературной плазмы может стать альтернативным методом защитной обработки древесины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Глебов И.Т. Физика древесины. Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. 80 с.
2. Рыбьев И.А. Строительное материаловедение. 2-е изд., испр. Москва : Высшая школа, 2004. 701 с.
3. Радина М.А. «Новое деревянное». Русское деревянное зодчество в современной интерпретации // Новые идеи нового века: материалы Международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2015. Т. 2. С. 208–214.
4. Косов И.И. Применения древесины в качестве конструкционного материала в XXI веке // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2019. № 2-1. С. 16.
5. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Потехин Н.И. Перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27. № 4. С. 128–136.
6. Сериков Е.А. Древесина – перспективный материал для строительства уникальных зданий и сооружений // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2015. № 20. С. 70–75.
7. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 351 с.
8. Стородубцева Т.Н., Аксомитный А.А., Донских Т.С. Защита древесины от влаги и гниения // Воронежский научно-технический вестник. 2014. Т. 3. № 4 (10). С. 68–73.
9. Сат Д.Х. Долговечность деревянных зданий и сооружений // Вестник Тувинского государственного университета. Вып. 3. Технические и физико-математические науки. 2022. № 4 (102). С. 48–55.
10. Тарбеева Н.А., Рублева О.А. Обоснование технологических возможностей способа упрочняющей декоративной обработки низкотемпературной древесины // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 3 (39). С. 145–154.
11. Тарбеева Н.А., Рублева О.А., Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Экспериментальное исследование комбинированного процесса изготовления облицовочных изделий на основе пьезотермической обработки деревянных заготовок // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1 (49). С. 90–97.
12. Ванин С.И. Гниль дерева, ее причины и меры борьбы. 3-е изд., испр. и доп. Москва ; Ленинград : Огиз : Гос. изд-во с.-х. и колхоз.-кооп. лит-ры, 1931. 160 с.
13. Владимирова Е.Г. Влияние термической модификации на некоторые физико-механические свойства древесины сосны (*Pinus sylvestris*) // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2011. № 5. С. 97–101.
14. Патент № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Безухов К.А., Черемных В.А.
15. Черемных В.А., Волокитин Г.Г., Клопотов А.А., Скрипникова Н.К. Перспективы использования плазменных технологий в области создания и обработки строительных материалов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 8 (764). С. 65–72.
16. Волокитин Г.Г., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В. и др. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 3 (40). С. 220–227.
17. Бондарцев А.С. Пособие для определения домовых грибов / Акад. наук СССР. Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова. Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1956. 80 с.

REFERENCES

1. Glebov I.T. Physics of wood. Yekaterinburg, 2018. 80 p. (In Russian)
2. Rybyev I.A. Building materials science. 2nd ed., Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 701 p. (In Russian)
3. Radina M.A. New wooden Russian architecture in modern interpretation. In: *Proc. Int. Sci. Conf. 'New Ideas of New Century'*, 2015. V. 2. Pp. 208–214. (In Russian)
4. Kosov I.I. The use of wood as a structural material in the XXI century. *Integral*. 2019; (2-1): 16. (In Russian)
5. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Potekhin N.I. Prospects for construction of unique wooden buildings. *Forestry Bulletin*. 2023; 27 (4): 128–136. (In Russian)
6. Serikov E.A. Wood as a promising material for construction of unique buildings. *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2015; (20): 70–75. (In Russian)
7. Ugolev B.N. Wood science and forest commodity science. Moscow, 2007. 351 p. (In Russian)
8. Storodubtseva T.N., Aksomitny A.A., Donskikh T.S. Wood protection from moisture and rot. *Voronezhskii nauchno-tekhnicheskii Vestnik*. 2014; 3 (4 (10)): 68–73. (In Russian)
9. Sat D.H. Durability of wooden buildings and structures. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. N 3 Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki*. 2022; 4 (102): 48–55. (In Russian)
10. Tarbeeva N.A., Rubleva O.A. Substantiation of strengthening decorative processing of low-grade wood. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2020;10 (3): 145–154. (In Russian)
11. Tarbeeva N.A., Rubleva O.A., Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. Experimental study of combined process of manufacturing facing products based on wood piezothermal processing. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2021; 1 (49): 90–97. (In Russian)
12. Vanin S.I. Tree rot, its causes and control. Leningrad, 1931. 160 p. (In Russian)
13. Vladimirova E.G. Influence of thermal modification on some physical and mechanical properties of pine wood (*Pinus sylvestris*). *Forestry Bulletin*. 2011; (5): 97–101. (In Russian)
14. Volokitin G.G., Shekhovtsov V.V., Bezukhov K.A., Cheremnykh V.A. Device for surface treatment of wood products with low-temperature plasma. UMP Rus. Fed. N 212821 U1. 2022. (In Russian)
15. Cheremnykh V.A., Volokitin G.G., Klopotov A.A., Skripnikova N.K. Prospects of using plasma technologies in the field of creation and processing of building materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2022; 8 (764): 65–72. (In Russian)
16. Volokitin G.G., Volokitin O.G., Shekhovtsov V.V., et al. Temperature field distribution in wood surface plasma processing. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013; 3 (40): 220–227. (In Russian)
17. Bondartsev A.S. Handbook for the definition of wood fungus. Leningrad, 1956. 80 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Волокитин Геннадий Георгиевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vgg-tomsk@mail.ru

Устинова Мария Владимировна, канд. экон. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ustinovoi@yandex.ru

Черемных Владимир Алексеевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vacheremnykh@gmail.com

Authors Details

Gennady G. Volokitin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vgg-tomsk@mail.ru

Maria V. Ustinova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ustinovoi@yandex.ru

Vladimir A. Cheremnykh, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vacheremnykh@gmail.com

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 02.05.2024
Одобрена после рецензирования 13.05.2024
Принята к публикации 14.05.2024

Submitted for publication 02.05.2024
Approved after review 13.05.2024
Accepted for publication 14.05.2024

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND MANAGEMENT

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 219–232.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 219–232.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 658.012

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-219-232

EDN: IYHXFM

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЫБОР ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СТРУКТУР УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Джавед Сират, Александр Алексеевич Руденко
Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Исследуются основные организационные структуры управления при строительстве технически сложных объектов, такие как функциональная, проектная и матричная, анализируются их преимущества и недостатки. С помощью экспертных оценок была выработана система организационно-технологических и экономических факторов, отражающая специфику строительства сложных объектов и оказывающая существенное влияние на систематизированные факторы. Кроме того, рассматриваются ключевые факторы, которые следует учитывать при разработке соответствующих организационных структур управления в строительстве.

Актуальность работы обусловлена усложнением современных строительных проектов и увеличением требований к их качеству, срокам и затратам на строительство. В условиях высокой конкуренции на строительном рынке и быстрых технологических изменений становится критически важным выбирать и адаптировать организационные структуры управления, которые могут обеспечить эффективное выполнение строительных проектов.

Цель. Исследование направлено на предоставление руководителям в строительной отрасли теоретических основ для оптимизации управленческих процессов, что способствует развитию точного понимания взаимосвязей между различными организацион-

ными структурами управления в строительстве и успешной реализации сложных строительных проектов. Для достижения этой цели был проведен анализ наиболее значимых факторов, которые оказывают влияние на эффективность управления проектами в сфере строительства.

Результаты исследования. Выявлено, что правильный выбор организационной структуры управления может значительно повысить эффективность и успешность реализации проектов строительства. Помимо этого, акцентирована важность адаптации организационной структуры управления к конкретным условиям каждого проекта, а также регулярное обновление стратегии управления в соответствии с изменяющимися требованиями и окружающей средой. Такой подход позволит сделать управление строительством более гибким и адаптивным к переменным условиям и технологическим изменениям.

Ключевые слова: управление строительством, организационная структура объекта, функциональная структура, проектная структура, матричная структура

Для цитирования: Джавед Сират, Руденко А.А. Анализ основных факторов, влияющих на выбор организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 219–232. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-219-232. EDN: IYHXFM

ORIGINAL ARTICLE

MAIN FACTORS AFFECTING CHOICE OF ORGANIZATIONAL STRUCTURES OF CONSTRUCTION MANAGEMENT

Jawed Serat, Aleksandr A. Rudenko

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article studies the main organizational structures of construction management such as functional, design and matrix, and analyzes their advantages and disadvantages. Based on expert assessments, a system of organizational, technological and economic factors was developed, reflecting the specifics of construction facilities and having a significant impact on systematized factors. Discussed are the key factors that should be considered when developing appropriate organizational structures in construction management.

Purpose: To provide facility managers with tools to directly apply the organizational theory, which contributes to the development of an accurate understanding of relationships between various organizational structures in construction management; to analyze the most significant factors that influence affecting the construction industry; to provide construction managers with a theoretical framework for optimizing the management processes that contributes to a successful implementation of construction projects.

Research findings: It was shown that a correct choice of organizational structure can significantly increase the efficiency of construction projects. The article emphasizes the importance of adapting the organizational structure to specific conditions of each project and regularly updating the management strategy in accordance with changing requirements and environment. This approach makes construction management more flexible and adaptive to variable conditions and technological changes.

Keywords: ceramics, construction management, organizational structure, functional structure, project structure, matrix

For citation: Jawed Sirat, Rudenko A.A. Main factors affecting choice of organizational structures of construction management. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo

Введение

Эффективности управления строительством и выбору организационных структур всегда придавалось большое значение, поскольку это создает необходимые предпосылки для более рационального использования всех видов ресурсов в ходе производственных процессов, что обеспечивает организационно-технологическую надежность и экономию строительства в целом.

Строительная отрасль является одной из самых сложных организационно-технологических систем, использующих разные составляющие производства, которые сосредоточены в компаниях различной подчиненности. Строительство охватывает предпроизводственную стадию (выполнение проектно-сметной документации) и производственную стадию (строительно-монтажные работы на объектах, относящихся к разным отраслям народного хозяйства), поэтому управление строительством и выбор организационных структур требуют согласования интересов межотраслевого и межведомственного характера [1].

Исследованием и анализом проблем управления строительством и выбора организационных структур при строительстве технически сложных объектов занимаются отечественные и зарубежные ученые. Так, в труде М.Н. Дудина и О.М. Толмачева [2] обоснованы принципы формирования и развития архитектурно-строительных систем, даны рекомендации по совершенствованию управления строительством при сооружении технически сложных объектов. Проблемы внедрения стратегического подхода к управлению строительством изучали А.Ф. Расулев, Е.Ю. Горбачевская, Л.Г. Никитюк и О.Г. Тимчук [3]. Б.Б. Хрусталев и Л.Н. Конкин разработали научные основы подготовки ускоренного создания промышленных комплексов [4].

Г. Морган, С. Уинтер, Т. Шечепанек [5] считают, что для эффективного управления строительством в строительных компаниях необходимо принимать во внимание разносторонний подход. Х. Мэйлор и его коллеги [6] используют метод управления строительством при взаимодействии со структурами проектов и организационными структурами. А.Дж. Сенхар [7] использует теорию непредвиденных обстоятельств для выделения различных типов проектов и способов их управления, хотя не затрагивает структуры проектных компаний. А. Кадефорс [8] проводит продольное исследование ранней стадии проектирования крупного объекта железнодорожного тоннеля, чтобы лучше понять, как организационные структуры и механизмы координации формируются и развиваются в крупных и сложных объектах инфраструктуры. Они связаны с необходимостью решения проблем устойчивого развития современных технически сложных объектов, основанных на принципах компактности, приоритета эффективности, ориентации на модернизацию и развитие существующей инфраструктуры, обусловленной увеличением общей численности технически сложных объектов, недостаточностью территориальных ресурсов для обеспечения функций крупных строительных компаний, необходимостью эффективного использования земельных ресурсов [9, 10]. Требуется разработка, внедрение современных архитектурно-планировочных, конструктивных, инженерных и организационно-технологических решений, противопожарных

мероприятий и санитарно-гигиенических норм в сфере процессов проектирования и строительства технически сложных объектов.

После анализа литературы по данной теме можно сделать следующие выводы:

1. Существующие исследования касаются общих принципов управления в строительстве, но глубокий анализ факторов, влияющих на выбор конкретных организационных структур при строительстве технически сложных объектов, остается недостаточным, и это создает потребность в дополнительных исследованиях.

2. Необходимо определить оптимальные организационные структуры управления для успешного строительства технически сложных объектов. Для решения этой проблемы следует провести более глубокий анализ и выявление оптимальных стратегий управления, учитывая конкретные условия технически сложных объектов в строительной отрасли.

Таким образом, дальнейшие исследования в этой области могут внести вклад в более полное понимание факторов, влияющих на выбор организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов, и предложить практические рекомендации для инженеров и работников управления в строительной отрасли.

Материалы и методы исследования

Определение эффективных организационных структур управления строительством тесно связано со взаимодействием основных участников строительного процесса, прежде всего проектировщиков, подрядчиков, заказчиков и инженерно-консультационных строительных компаний, а также с учетом воздействия внешней среды.

Основные научные и практические сведения по направлениям управления строительством при сооружении технически сложных объектов показывают, что на основе систематизации и обобщения данных путем изучения имеющихся литературных источников, анализа деятельности и учета текущей ситуации в стране была разработана система классификации факторов, влияющих на выбор оптимальных организационных структур управления строительством.

Наличие разнообразных методик выбора организационных структур управления строительством предоставляет возможность выбора такой, которая наилучшим образом соответствует взаимным интересам, а также требованиям всех участников строительного процесса, поэтому был проведен анализ относительной эффективности различных организационных структур управления строительством с учетом основных факторов.

Определение соответствующей организационной структуры управления строительством в каждой конкретной ситуации требует основательного анализа многочисленных факторов. Данный анализ включает в себя оценку характеристик объекта, требований участника строительного процесса, наличие опыта, а также анализ внешней среды, в которой этот процесс функционирует. Значимость повышения эффективности новых организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов проявляется в готовности управляющего проектом к решению комплексных проблем, которые объединяют различные инженерные и другие дисциплины.

Организационные структуры управления

При обсуждении организационных структур важным аспектом является принятие решения относительно выбора той, которая будет использоваться для его выполнения. Эта структура будет формировать взаимоотношения между участниками проекта и регулировать их взаимодействие с другими проектами или внешней средой.

Данный процесс также включает четкое определение полномочий каждого участника и установку эффективных линий коммуникации, контроля, согласования и сотрудничества между ними.

Действительно, существует разнообразие организационных структур управления строительством, которые отличаются по размеру, системе отчетности, распределению полномочий, степени ответственности и другим аспектам. В литературе широко выделяют три основных вида организационных структур управления строительством: функциональная, проектная и матричная [11, 12].

Невозможно утверждать, что одна из данных структур является универсально наилучшей для всех видов объектов.

Учитывая особенности каждого проекта и требование к индивидуальному подходу в управлении, крайне важно внимательно выбрать и адаптировать организационную структуру в соответствии с требованиями конкретного объекта. Этот выбор должен учитывать такие факторы, как организационная среда, характеристики проекта, уровень полномочий и др. В данном контексте предпримем подробный анализ трех упомянутых типов организационных структур управления строительством.

Сравнение организационных структур управления

Отсутствие идеальной структуры подтверждается тем, что каждый ее вариант обладает своими преимуществами и недостатками.

На примере можно отметить, что матричная организационная структура способствует эффективному управлению дисциплиной и ориентированности на проект, однако сопровождается возможными конфликтами и неопределенностью в сфере полномочий.

Приведенное утверждение указывает на сущность компромисса между функциональной и проектной организацией, при этом отмечается, что матричная структура обладает более низким уровнем требований к квалификации персонала по сравнению с проектной структурой и сложные компании лучше справляются с матричной структурой, чем с функциональной или проектной. Р. Мишра и Т. Соота [13] выражают мнение о том, что функциональная структура эффективна лишь в случае непрерывных и рутинных операций, где вопросы координации играют менее важную роль и специалисты группируются для выполнения определенной функции, однако теряют общий обзор проекта.

Отмечается, что возникающие проблемы могут быть связаны с неясностью полномочий и отчетности, что замедляет процесс принятия решений. В рамках проектной структуры предусмотрено наличие нескольких сотрудников, специализирующихся в различных областях, которые подотчетны конкретному проектному руководителю.

Данная структура характеризуется повышенными требованиями к квалификации персонала и, следовательно, может быть рекомендована для реализации крупных проектов. В табл. 1 представлены основные преимущества и недостатки трех типов организационных структур управления.

Таблица 1

Основные преимущества и недостатки трех типов организационных структур

Table 1

Main advantages and disadvantages of three typical organizational structures

Организационные структуры	Преимущества	Недостатки
Функциональная	Отсутствует необходимость в осуществлении переговоров, не требуется конкурировать с другими областями для обеспечения ресурсами. Участники группы знакомы друг с другом, поскольку работают в одной сфере	В отрасли программирования может возникнуть ситуация, при которой отсутствуют все необходимые специалисты для успешной реализации проекта. Кроме того, у членов команды могут возникнуть дополнительные обязанности в рамках программного подразделения, поскольку они не в состоянии работать над проектом в течение полного рабочего дня
Проектная	Руководитель проекта удерживает контроль над всем процессом, обеспечивая тщательное управление проектом. Имеются централизованные каналы связи. Члены команды проявляют выраженное чувство принадлежности к проекту и обладают глубоким пониманием его целей	Использование ресурсов становится затратным и неоптимальным из-за дублирования нескольких ресурсов в различных проектах. Ограничены возможности обмена знаниями и профессионального развития, т. к. члены команды заняты выполнением одного проекта одновременно
Матричная	Эффективное распределение специалистов, позволяющее полностью задействовать их в работе над несколькими проектами. Сотрудники имеют возможность перемещаться из одного подразделения в другое, не делая этот переход постоянным. Обеспечивается эффективный поток информации, который содействует более легкому обмену знаниями между членами команды даже в пределах различных подразделений. Кроме того, достигается сильная координация проекта и улучшенный контроль	Высокие административные затраты. Разделение полномочий между линейными руководителями проектов, что может привести к конфликтам. Отношения в сфере отчетности могут быть сложными. Некоторые члены команды могут подчиняться руководителям программных подразделений, фактически выполняя задачи для одного или нескольких руководителей проектов

В рамках проектной структуры, как правило, проектно-строительная компания осуществляет объединенное выполнение ключевых этапов: проектирование и строительство.

В матричной структуре производится управление всем инвестиционным процессом строительства, порученное специализированной компании, занимающейся управлением строительством. Р. Мишра и Т. Соота выражают точку зрения, что такой подход может оказаться полезным при выборе подходящей организационной структуры управления строительством в развитых индустриальных странах. Анализ текущего положения строительной отрасли в Афганистане подчеркивает активное развитие процесса создания промышленных и обрабатывающих зон, а также улучшение инфраструктурной базы. В результате этого в качестве основных объектов для дальнейших исследований были выбраны крупные проекты в промышленной сфере и сложные инфраструктурные инициативы, такие как модернизация аэропортов и строительство мостов, с учетом их значимости и влияния на развитие строительной отрасли в стране.

Результаты исследования

Для эффективности выбора организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов использовался метод экспертных оценок. Данный метод представляет собой эвристический подход, который находит применение в ситуациях, где получение решения исключительно математическими методами представляется сложным. Основным принципом метода состоит в проведении анализа и систематизации взглядов экспертов, специализирующихся в конкретной области, с применением метода анкетирования.

Исследование посвящено ранжированию факторов, влияющих на эффективность выбора организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов. Для обеспечения консистентности и достоверности результатов ранжирования факторов исследование включает участие 5 экспертов, результаты представлены в табл. 2.

Для оценки согласованности мнений экспертов, проверки результатов экспертного опроса и измерения степени взаимосвязи между ранжированными факторами использовался коэффициент конкордации (W):

$$W = \frac{12S}{d^2(n^3 - n) - d \sum T_i} = 1,13, \quad (1)$$

где n – количество рассматриваемых факторов; d – количество участвующих экспертов; S – сумма квадратов разностей между суммой рангов и их средней арифметической; T_i – количество повторяющихся элементов в оценках i отдельного эксперта. В связи с тем, что значение коэффициента конкордации $W > 0,5$, можно утверждать о наличии консистентности мнений экспертов, и это свидетельствует о высокой степени согласованности мнений между экспертами.

Для выбора организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов, при использовании коэффициента Кендалла с пятью экспертами, можно применять шкалу от 1 до 5, что обеспечит соответствие числу экспертов.

Таблица 2

**Оценка влияния факторов при выборе организационных структур
управления строительством технически сложных объектов**

Table 2

**Factors affecting the choice of organizational structures
for construction management of complex objects**

Наименование фактора	Количество экспертов, n					$\sum_{i=1}^n r_i$	W_i
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	$W_i = \sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_i + 1}{nx(n+1)}$	
1. Оценка стоимости строительства	4	3	5	4	2	18	0,036
2. Сокращение продолжительности строительства	3	4	4	5	3	19	0,036
3. Улучшение качества технического надзора	5	2	3	4	5	19	0,038
4. Уменьшение уровня риска для заказчика	4	5	4	3	4	20	0,038
5. Профессиональный опыт работы с аналогичными объектами	4	5	4	3	4	20	0,04
6. Применение современных технологий при проектировании и строительстве	5	4	5	4	3	21	0,042
7. Обеспечение контроля за ходом реализации проекта	3	4	3	5	2	17	0,034
8. Концентрация ответственности в рамках одной компании	4	3	4	4	5	20	0,04
9. Охрана окружающей среды	2	3	2	4	3	14	0,028
10. Высокое качество проектно-сметной документации	5	4	5	3	4	21	0,042
11. Использование передовых технологических решений в проектах	4	5	4	3	5	21	0,042
12. Глубокие знания технологии строительства и эффективное управление процессом строительства	4	3	5	4	4	20	0,04
13. Повышение уровня качества выполненных строительных работ	5	4	3	4	5	21	0,042
14. Подготовка к строительству и разработка документации по организации и технологии	3	4	5	3	4	19	0,038
15. Обширный опыт в строительной компании схожих объектов	4	5	4	3	4	20	0,04
16. Иерархическая структура системы управления	3	4	3	5	2	17	0,034

Окончание табл. 2
End of table

Наименование фактора	Количество экспертов, n					$\sum_{i=1}^n r_i$	W_i
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	$W_i = \sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_i + 1}{nx(n+1)}$	
17. Сотрудничество в производственной деятельности	4	3	4	4	5	20	0,04
18. Оптимальное сочетание централизованного и децентрализованного управления	5	4	5	4	3	21	0,042
19. Размеры и масштаб предполагаемого объекта	4	5	4	3	4	20	0,04
20. Длительность этапа проектирования	3	4	3	5	2	17	0,034
21. Общая стоимость объекта	5	4	5	4	3	21	0,042
22. Высокие требования к качеству строительства	4	3	4	4	5	20	0,04
23. Степень изменяемости планировочных и конструктивных решений	3	4	3	5	2	17	0,034
24. Гибкость технологии изготовления продукции с учетом ее транспортировки	4	5	4	3	5	21	0,042
25. Уровень научно-технического развития в стране	3	4	3	4	2	16	0,032
26. Уровень развития инфраструктуры в стране	4	5	4	3	4	20	0,04
27. Развитие промышленной базы в стране	5	4	5	4	3	21	0,042

Это позволит каждому эксперту выставлять оценки в пределах от 1 до 5 для каждого оцениваемого фактора:

1 – низкое согласование; 2 – слабое согласование; 3 – умеренное согласование; 4 – высокое согласование; 5 – очень высокое согласование. Оценка степени согласованности также проводится посредством вычисления коэффициента корреляции Кендалла с использованием предложенного ниже уравнения:

$$X_p^2 = wm(n-1) = 1,13 \cdot 5(27-1) = 146,9. \quad (2)$$

Рассчитанный коэффициент Пирсона сопоставляется с табличным значением для числа степеней свободы $n - 1 = 26$ при установленном уровне значимости $\alpha = 0,05$. Учитывая, что расчетное значение критерия (146,9) превышает табличное (38,752), можно утверждать, что данная величина является статистически значимой. Таким образом, полученные результаты обладают высокой степенью значимости и пригодны для использования в последующих исследованиях.

Формирование общей оценки и определение относительного веса рассматриваемых факторов

Для вычисления весовой функции каждого фактора при наличии 5 экспертов и 27 факторов можно воспользоваться методом анализа иерархий (МАИ), который позволяет определить относительную важность каждого фактора на основе мнения экспертов.

Вес фактора для каждого эксперта i (W_i) можно рассчитать по следующей формуле:

$$W_i = \sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_i + 1}{nx(n+1)}, \quad (3)$$

где r_i – ранг, присвоенный экспертом i ; n – общее количество экспертов. Эффективным способом решения данных задач является применение средних значений для обобщения результатов.

В рамках последующего исследования будут рассмотрены 15 факторов, которые обладают высокой степенью важности для выбора организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов, и их воздействие на функционирование строительных компаний. В связи с этим остальные факторы, согласно экспертному мнению, оказывают незначительное воздействие на операции строительных работ и не принимаются во внимание.

Исходя из результатов данного исследования, можно рассматривать основные факторы для выбора организационных структур управления строительством, влияющие на строительное производство в развивающихся странах, в том числе в Афганистане. Таким образом, данные факторы могут стать руководством для исследователей, заинтересованных в оптимизации затрат времени и ресурсов на строительство.

Для оценки важности критериев эффективности выбора организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов используется формальная шкала, представленная в виде пятибалльной системы. Следовательно, для каждого критерия определена система весовых коэффициентов. В настоящем исследовании предлагается применять шкалу весовой функции в диапазоне от 1 до 5. Следовательно, высший балл 5 присваивается наиболее значимому критерию, в то время как низший балл 1 – наименее значимому критерию. Весовые коэффициенты для показателей и экспертной компетентности представлены нормированными значениями. Критерии эффективности управления включают в себя минимизацию затрат, уменьшение времени строительства, повышение технологичности строительных процессов и пр.

В табл. 3 представлены результаты оценки относительной эффективности организационных структур в управлении строительством, систематизированные в соответствии с указанными критериями принятия решений.

Анализ оценок по конкретному критерию выполнялся в соответствии с простым принципом. Например, большинство участников опроса выразили согласие с тем, что критерий «минимизация затрат на строительство» является крайне важным для заказчика, и по этой причине ему была присвоена максимальная оценка – 5 баллов.

Таблица 3

**Матрица оценок важности критериев при принятии решения
об организационной структуре управления в строительстве
с учетом различных весовых функций**

Table 3

**Evaluation of criteria in making decisions on the organizational structure
in construction management with weighting functions**

Критерии эффективности	Весовая функция	Типы организационных структур		
		Функциональная	Проектная	Матричная
Минимизация затрат на строительство	5	2	4	3
Сокращение продолжительности строительства	4	4	5	1
Повышение качества	3	4	1	3
Реализация проектов, соответствующих современным стандартам и требованиям	4	4	3	4
Снижение уровня риска для заказчика	4	1	3	5
Технологичность	3	5	1	3
Обеспечение контроля за ходом реализации проекта	2	5	1	3
Определение окончательной стоимости проекта до начала строительства	3	1	5	4
Защита окружающей среды	1	5	3	4
Централизация обязанностей в рамках одной компании	2	1	5	4
Итоговая оценка критериев	–	93	100	103

В соответствии с утверждением 67,5 % заказчиков, «сокращение продолжительности строительства» также представляет собой весьма значимый критерий, получивший оценку в 4 балла.

Результаты оценки целей и характеристик технически сложного объекта, условий проекта и ситуации в развивающейся стране, для которой предлагается методический подход, подтверждают, что организационная структура управления строительством, аналогичная «матричной структуре», представляет собой более предпочтительный вариант (общая оценка – 103) по сравне-

нию с «проектной структурой» (общая оценка – 100) и «функциональной структурой» (общая оценка – 93).

Заключение

В результате проведенного анализа факторов, оказывающих влияние на выбор организационных структур управления при строительстве технически сложных объектов, можно сделать следующие выводы:

1. Подробно рассмотрены три основные организационные структуры управления в строительстве: функциональная, проектная и матричная.

2. Проанализированы преимущества и недостатки каждой организационной структуры управления строительством, выявлены сильные и слабые стороны, что помогает лучше ориентироваться при выборе.

3. Проведенный анализ ключевых факторов, включая стоимость, продолжительность строительства и технологичность, выделяет критерии эффективности для каждой структуры.

4. Отмечена важность индивидуального подхода при выборе организационной структуры управления, подчеркивается, что оптимальный выбор зависит от уникальных характеристик каждого проекта.

5. Выводы предоставляют ценные рекомендации для разработки эффективных систем управления в строительной сфере, акцентируя внимание на адаптации к конкретным условиям объекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Артеменко А.А. Актуальные вопросы инновационного развития строительства // Молодой ученый. 2015. № 11. С. 742–744.
2. Дудин М.Н., Толмачев О.М. Практика внедрения инновационных технологий в строительной отрасли // Вопросы инновационной экономики. 2017. № 4. С. 407–416.
3. Расулев А.Ф., Горбачевская Е.Ю., Никитюк Л.Г., Тимчук О.Г. Повышение уровня инновационного потенциала предприятий строительной отрасли // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. № 2 (29). С. 260–273.
4. Хрусталева Б.Б., Конкин Л.Н. Факторы, влияющие на инновационно-инвестиционную деятельность в строительной отрасли // International Agricultural Journal. 2019. № 4. С. 219–227.
5. Морган Г., Сейдж Винтер М., Щечепанек Т. Образы организаций и рефрейминг управления проектами: новое мышление, новая практика. Aldershot, United Kingdom : Gower Publishing, 2007. С. 230–250.
6. Мэйлор Х., Брейди Т., Кук-Дэвис Т., Ходжсон Д. От проектирования к программированию // Международный журнал управления проектами. 2006. Т. 24. С. 663–764.
7. Сенхар А.Дж. Стратегическое управление проектами: новые рамки // Портлендская международная конференция по менеджменту и технологиям. 1999. С. 100–110.
8. Кадефорс А. Институты в строительных проектах: последствия для гибкости и изменений // Скандинавский журнал менеджмента. 1995. Т. 11. № 4. С. 395–408.
9. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В., Лейбман Д.М. Особенности инжиниринговой схемы управления строительством технически сложных объектов // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 79–83.
10. Сборщиков С.Б., Шинкарева Г.Н., Маслова Л.А., Лейбман Д.М. Оценка эффективности управления реализацией строительного проекта в условиях воздействия случайных факторов // Вестник МГСУ. 2017. № 11 (110). С. 1240–1247.
11. Виллинова К. Международная организационная структура управления проектами : диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Масариков университет, 2014. С. 752–764.

12. Лухтарский Дж.М. Барьеры развития проектных структур // Управление. 2008. № 12. С. 108–119.
13. Мишра Р., Сота Т. Современное управление проектами. Нью-Дели : New Age International (P) Ltd. Publishers, 2006 [цит. 10 марта 2013]. С. 150–157.

REFERENCES

1. Artemenko A.A. Current issues of innovative development of construction. *Molodoi uchenyi*. 2015; (11): 742–744. (In Russian)
2. Dudin M.N., Tolmachev O.M. Innovative technologies in the construction industry. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2017; (4): 407–416. (In Russian)
3. Rasulev A.F., Gorbachevskaya E.Yu., Nikityuk L.G., Timchuk O.G. Increasing the level of innovative potential of enterprises in the construction industry. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2019; (2 (29)): 260–273. (In Russian)
4. Khrustalev B.B., Konkin L.N. Factors affecting innovation and investment activity in the construction industry. *International Agricultural Journal*. 2019; 62 (4): 219–227.
5. Morgan G., Sage Winter M., Szczechpanek T. Images of organizations and project management reframing: New thinking, new practice. Aldershot, United Kingdom: Gower Publishing, 2007. Pp. 230–250.
6. Maylor H., Brady T., Cooke-Davies T., Hodgson D. From projectification to programmification. *International Journal of Project Management*. 2006; 24: 663–764.
7. Senhar A.J. Strategic project management: The new framework. In: *Proc. Portland Int. Conf. of Management and Technology*. 1999. Pp. 100–110.
8. Kadefors A. Institutions in building projects: Implications for flexibility and change. *Scandinavian Journal of Management*. 1995; 11 (4): 395–408.
9. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V., Leibman D.M. Engineering scheme of construction management of complex objects. *Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova*. 2016; (11): 79–83. (In Russian)
10. Sborshchikov S.B., Shinkareva G.N., Maslova L.A., Leibman D.M. Management effectiveness of construction project under the influence of random factors. *Vestnik MGSU*. 2017; 11 (110): 1240–1247. (In Russian)
11. Villinova K. International organizational structure of project management. PhD Thesis. Masaryk University, 2014. Pp. 752–764. (In Russian)
12. Likhtarsky J.M. Barriers of design structure development. *Upravlenie*. 2008; (12): 108–119. (In Russian)
13. Mishra R., Soota T. Modern project management. New Delhi: New Age International (P) Ltd., 2005. Pp. 150–157.

Сведения об авторах

Джавед Сират, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, jawed.serat@yandex.ru

Руденко Александр Алексеевич, докт. экон. наук, канд. техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4, rudenko.a@mail.ru

Authors Details

Jawed Serat, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia. jawed.serat@yandex.ru

Aleksandr A. Rudenko, DSc, Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia. rudenko.a@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.02.2024
Одобрена после рецензирования 04.03.2024
Принята к публикации 19.04.2024

Submitted for publication 20.02.2024
Approved after review 04.03.2024
Accepted for publication 19.04.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 233–241.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 233–241.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-233-241

EDN: FNXJOL

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СНЕГОПЕРЕДУВАЮЩИХ И СНЕГОЗАЩИТНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОТ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ

Денис Николаевич Санников, Вадим Вячеславович Серватинский
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. Статья посвящена применению методов компьютерного моделирования снегопередувающих процессов для сравнения принципов работы ограждений, защищающих автомобильные дороги от снежных заносов.

Актуальность. Проблема снежных заносов актуальна для многих автомобильных дорог в удаленных, труднодоступных районах и сложных климатических условиях. Снежные заносы значительно увеличивают расходы на зимнее содержание автомобильных дорог, являются причиной разрушения дорожного полотна, а также создают серьезную угрозу безопасности, ухудшая видимость и приводя к потере контроля над транспортным средством.

Моделирование процессов снегопередувания проводилось в программе Solid Works Flow Simulation. Данная программа – это инструмент общего назначения для моделирования потоков жидкости и газа.

В исследовании освещены вопросы, связанные с оценкой состава, скорости и движения снежных частиц в метелевом потоке.

Целью исследования является разработка ограждений, которые будут способствовать передуванию снега через автомобильную дорогу.

Результаты. Определена основная цель и условия работы снегопередувающих конструкций на автомобильных дорогах.

Опыт показал, что внедрение снегопередувающих и снегозащитных ограждений положительно сказывается на зимнем содержании дорог. Рассмотрен процесс снегопередувания и его влияние на снеготранспортируемость. Базисно работа снегопередувающих конструкций направлена на защиту автомобильных дорог от устойчивого метелевого ветра. На основании рассматриваемого подхода выполнен сравнительный анализ установки разных видов снегопередувающих конструкций вдоль участков дороги. Изучены возможности изменения конструктивных доработок и анализ показателей эффективности.

Ключевые слова: снегозащитные ограждения, снегоперенос, снеготранспортируемость, снегопередувающие ограждения, сдувание снега, снежные заносы, снежные отложения

Для цитирования: Санников Д.Н., Серватинский В.В. Моделирование работы снегопередувающих и снегозащитных ограждений для защиты автомобильных дорог от снежных заносов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 233–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-233-241. EDN: FNJXOL

ORIGINAL ARTICLE

SIMULATION OF SNOW FENCES FOR ROAD PROTECTION FROM DRIFTED SNOW

Denis N. Sannikov, Vadim V. Servatinsky

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Purpose: The development of snow fences to provide the snow blowing over automobile roads to protect them from drifted snow.

Methodology/approach: Computer simulation in SOLIDWORKS Flow Simulation of snow fences to study their operation. Discussion of issues related to estimating the composition, velocity, and motion of snow particles in drifted snow. Comparative analysis of different types of snow fences installed along road sections.

Research findings: The main purpose and operations conditions are determined for snow fences on automobile roads. Design modifications and efficiency factors of snow fences are studied herein.

Value: It is shown that the use of snow fences has a positive effect on winter road maintenance.

Keywords: snow fence, drifted snow, snow formation

For citation: Sannikov D.N., Servatinskii V.V. Simulation of snow fences for road protection from drifted snow. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 233–241. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-233-241. EDN: FNJXOL

Введение

Зимой дорожные условия ухудшаются на значительной территории Российской Федерации. Основной причиной сложной обстановки на автомобильных дорогах являются снежные отложения и заносы. Во время метелей снег откладывается на дорожном полотне. Решением данной проблемы может послужить разработка новых методов защиты автомобильных дорог и совершенствование существующих [1].

Несвоевременная уборка автомобильных дорог от снежных отложений увеличивает расходы на их эксплуатацию. Снег на дорожном полотне снижает безопасность передвижения транспортных средств: ухудшается видимость, перекрываются дорожные знаки, вследствие снежных заносов уменьшается ширина проезжей части и заносятся дорожные ограждения.

Опыт разных стран показал, что борьба со снежными метелями и снежными заносами требует дополнительных мер защиты, помимо уборки снега снегоуборочной техникой. К дополнительным мерам можно отнести установку снегозащитных ограждений снегопередающих конструкций, посадку снегозащитных лесополос [2, 3, 4, 5].

Целью настоящего исследования является разработка снегопередающих ограждений для автомобильных дорог, сравнение работы разных снегозащитных и снегопередающих ограждений и выявление их положительных характеристик. Для оценки использовалась К- ϵ RNG модель турбулентности. Расчет и моделирование воздушного потока выполнялись в программе Solid Works Flow Simulation.

Снежная буря – это двухфазный поток, в котором происходит взаимодействие снега (твердого материала) и воздуха. Во время снежной бури происходит непрерывный контакт земной поверхности и воздуха с частицами снега.

Виды фаз метели [6]:

1. Низовое движение – скольжение частиц снега по поверхности (максимальное количество сантиметров).
2. Скачкообразное движение – беспорядочное перемещение частиц «во время прыжка» в воздушном пространстве (по закону броуновского движения).
3. Взвесь (диффузия) – частицы снега поднимаются на высоту более 1 м во время снежной бури.

Процесс скачкообразного движения и диффузии важно учитывать в вопросах защиты от снега и выдувания снега.

Для решения проблемы снежных заносов был проведен анализ разных снегозащитных средств и ограждений. Различие между этими двумя типами заключается в том, что снежные барьеры задерживают снег вблизи искусственных сооружений, а снегопередающие ограждения помогают сдувать снег с дороги, отодвигая снежные отложения на безопасное расстояние [7, 8, 9, 10].

Конструктивные особенности снегопередающих ограждений ускоряют прохождение снега во время метели через дорожное покрытие, предотвращая оседание снежных заносов и способствуя образованию сугробов за дорожным покрытием [3].

Моделирование снегопередающих и снегозащитных ограждений

Моделирование воздушного потока в Solid Works Flow Simulation основано на результатах оценки различных типов защиты от снежных заносов. Расчеты проводились в двумерных условиях. Среднее значение Рейнольдса по уравнению Навье – Стокса рассчитывается с использованием модели турбулентности К- ϵ RNG. Этот тип модели часто применяется в программах аэродинамического моделирования.

В ходе моделирования были приняты стационарные данные для всех ограждений: шероховатость – 10 мкм, давление – 760 мм рт. ст., плотность воздушного потока – $1,2 \text{ кг/м}^3$, температура окружающей среды – минус $20 \text{ }^\circ\text{C}$ и скорость изначального воздушного потока – 11 м/с (рис. 1).

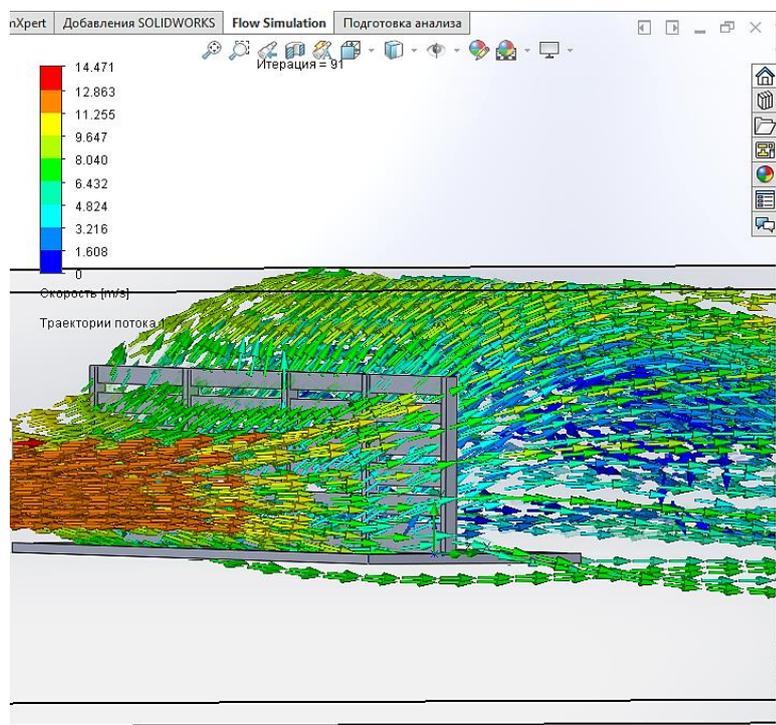


Рис. 1. Моделирование работы снегозащитных ограждений
Fig. 1. Snow fence operation simulated in SOLIDWORKS Flow Simulation

Для анализа аэродинамических свойств метели были смоделированы снегозащитное ограждение без снегопередающего эффекта и снегопередающие ограждения с разным конструктивом.

Для анализа аэродинамических характеристик снежных бурь рассмотрены снегозащитные ограждения без возможности передувания снежной бури и снегопередающие ограждения различной конструкции, имеющие такую возможность.

Снегозащитное ограждение представляет ряд панелей, установленных на опоры с просветностью $0,3$. С данным коэффициентом просветности максимально снижается процесс завихрения, который негативно сказывается на подветренной зоне осаждения снежных частиц. В процессе моделирования воздушных масс было выявлено, что такой тип ограждений максимально способствует только задержанию снега без передающего эффекта. В данном типе ограждения возникает существенная турбулентность, что, в свою очередь, влечет за собой отложения снега за снежным барьером, а именно шлейф снежных отложений достигает внушительных размеров и мешает движению

транспортного средства. Кроме того, во время снежной бури скорость воздушного потока значительно снижается – с 11 до 1,5 м/с.

После анализа снегозащитного ограждения оценили упрощенный вариант снегопередающего ограждения, представленного на рис. 2. Данный тип ограждений отличается от классических снегозащитных ограждений наличием нижнего зазора между земляным полотном и ветропередающей панелью, который находится в соотношении 40 на 60 относительно высоты ограждения. Прозветность у такого типа ограждений меньше, чем у снегозащитных, и составляет 0,2 ввиду малой площади ветронаправляющей панели. Зазор в нижней части способствует увеличению скорости воздушного потока за счет эффекта сжатия воздушного потока. Снежная буря передается в нижний зазор, увеличивая скорость, переносится через дорожное полотно.

Моделирование работы снегопередающего ограждения показано на рис. 3 и 4. Можно утверждать, что эффект завихрения воздушного потока за ограждением уменьшается по сравнению с работой снегозащитного ограждения, распределение же воздушного потока более равномерное. Также нижняя часть открыта, что создает эффект сжатия и ускорения воздушного потока, передающего снег. Снижение скорости воздушного потока в нижней части ограждения является незначительным – с 11 до 9 м/с.

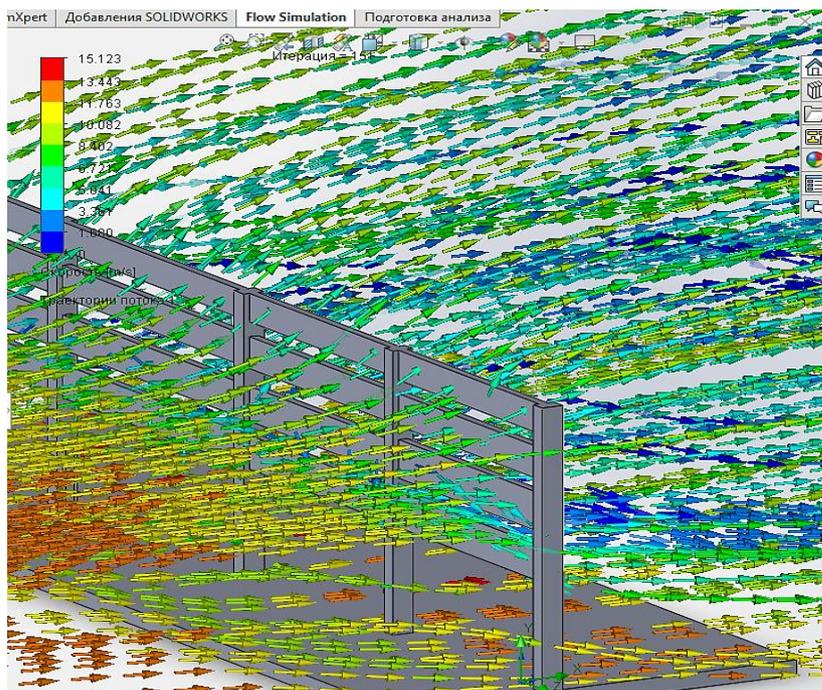


Рис. 2. Моделирование стандартных снегопередающих ограждений
 Fig. 2. Standard snow fences simulated in SOLIDWORKS Flow Simulation

Разработано снегопередающее ограждение, отличное от стандартных снегопередающих ограждений, работа которого представлена на рис. 3 и 4.

За счет изменения форм и на основании аэродинамических исследований была выявлена форма с максимальным передуваяющим эффектом. Ветронаправляющая панель представлена в виде полусферы, за счет такой формы ветер максимально эффективно может передуваться через дорожное полотно. Зазор в представленном типе ограждения в самой узкой точке составляет 80:20 по отношению к ветронаправляющей панели. В верхней части конструкции установлен обтекатель, в результате которого между основной ветронаправляющей панелью и обтекателем возникает увеличение скорости воздушного потока. На основе моделирования выбраны оптимальная форма и длина нижнего элемента. Форма разработанного нижнего элемента способствует максимальному сжиманию воздушного потока между ограждением и дорожным полотном, что приводит к повышению скорости и, как следствие, увеличению дальности передувания снега через дорожное полотно.

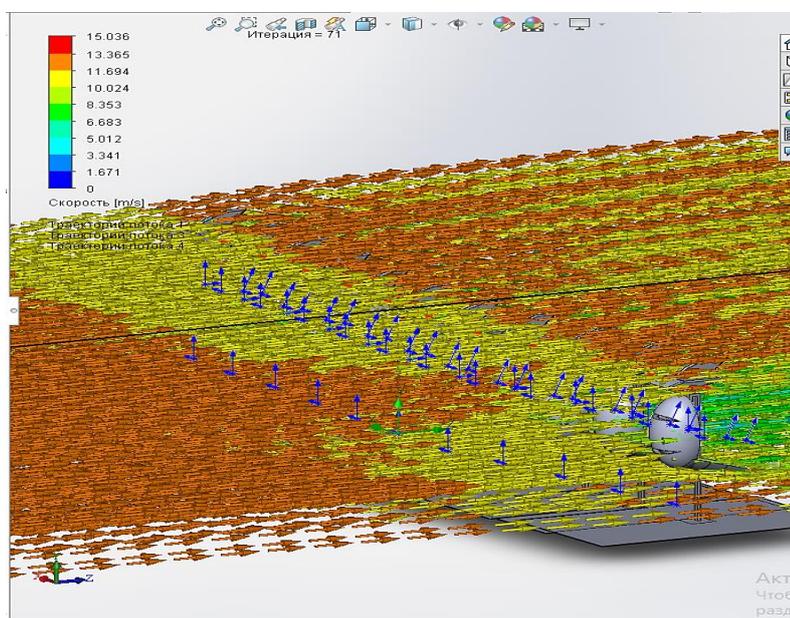


Рис. 3. Моделирование воздушных потоков на предложенном снегопередуваящем ограждении
 Fig. 3. Air flows near the proposed snow fences

По результатам моделирования аэродинамических процессов предложенного снегопередуваящего ограждения было выявлено, что форма основной панели соответствует условиям максимального передувания воздушного потока. Зазоры в нижней и верхней частях основной панели уменьшают турбулентность и положительно влияют на обзорность автомобилей во время движения. Согласно закону Бернулли, элементы, добавленные в виде верхних крыльев и нижних зазоров, способствуют возникновению разности давления. Давление внизу конструкции ниже, чем давление в верхней части, в результате чего воздушный поток меняет направление, и, как следствие, скорость перемещения снега увеличивается.

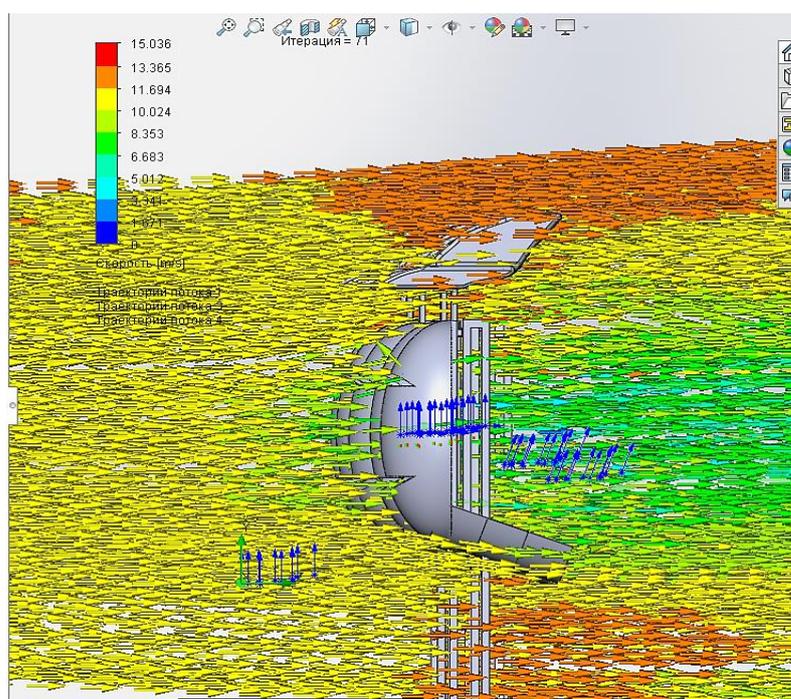


Рис. 4. Моделирование работы разработанных снегопередувающих ограждений
 Fig. 4. Operation of proposed snow fences

Анализируя конструктивные особенности упрощенного снегопередувающего ограждения и предложенного снегопередувающего ограждения, можно сделать вывод, что изменение формы основной панели, размера нижнего зазора и внедрение верхнего обтекателя будут способствовать уменьшению воздействия метели и обеспечат защиту дорожного полотна от снежных заносов.

Заключение

В статье рассмотрены проблемы, связанные с предотвращением снежных заносов на автомобильных дорогах. Смоделированы процессы работы снегопередувающих и снегозащитных ограждений для борьбы со снежными бурями на автомобильных дорогах. Можно утверждать, что внедрение дополнительных мер борьбы со снежными отложениями будет снижать объем работы для снегоуборочной техники, а также повысит безопасность передвижения транспорта и долговечность дорожного полотна. На основе полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Внедрение верхнего обтекателя и нижнего элемента в снегопередувающее ограждение позволило увеличить скорость воздушного потока до 14 м/с, что составляет прирост в скорости на 23 % от изначальной. Данные элементы способствуют переносу снежных частиц во время метели через автомобильную дорогу, отодвигая шлейф снежных отложений на требуемое расстояние.

2. Сравнение работы снегозащитных и снегопередувающих ограждений, анализ результатов изменения скорости воздушного потока показали, что

наличие передвигающихся элементов сможет переместить снежные массы за дорожное полотно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бялобжеский Г.В., Дюнин А.К., Плакса Л.Н., Рудаков Л.М., Уткин Б.В.* Зимнее содержание автомобильных дорог / под ред. А.К. Дюнина. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1983. 197 с.
2. *Бабков В.Ф.* Дорожные условия и безопасность движения. Москва : Транспорт, 1993. 270 с.
3. *Васильев А.Л.* Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях. Москва : Транспорт, 1976. 224 с.
4. *Васильев А.П.* Защита от снега // Автомобильные дороги. 2010. № 12. С. 69–76.
5. *Паневин Н.И.* Организация борьбы со снегоотложениями на дорогах на основе региональных расчетных параметров метели : специальность 05.23.11 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Паневин Николай Иванович. Воронеж, 1999. 170 с.
6. *Tabler R.D.* Controlling blowing and drifting snow with snow fence // Government Engineering. 2005. July-Aug. P. 30–32.
7. *Васильев А.Л.* Проектирование дорог с учетом влияния климата на условия движения. Москва : Транспорт, 1986. 248 с.
8. *Самодурова Т.В., Гладышева О.В.* Защита от снега // Автомобильные дороги. 2013. № 11 (984). С. 77–80.
9. *Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization.* Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence // Research Report. 2018.
10. *Kaneko M., Watabe T., Matsuzawa M.* Revision of Highway Snowstorm Countermeasure Manual. Focus on Snowbreak Woods // Transportation Research Circular. 2012. NoE-C162. Apr. P. 143–153.

REFERENCES

1. *Byalobzhesky G.V., Dunin A.K. (Ed.), Plaksa L.N., Rudakov L.M., Utkin B.V.* Winter maintenance of roads. 2nd ed., Moscow: Transport, 1983. 197 p. (In Russian)
2. *Babkov V.F.* Road conditions and traffic safety. Moscow: Transport, 1993. 270 p. (In Russian)
3. *Vasiliev A.L.* Road condition and vehicle traffic safety in difficult weather conditions. Moscow: Transport, 1976. 224 p. (In Russian)
4. *Vasiliev A.P.* Road protection from snow. *Avtomobil'nye dorogi*. 2010; (12): 69–76. (In Russian)
5. *Panevin N.I.* Road protection from snow formation using regional calculated parameters of snowdrift. PhD Thesis Voronezh, 1999. 170 p. (In Russian)
6. *Tabler R.D.* Controlling blowing and drifting snow with snow fence. Government Engineering, 2005. Pp. 30–32.
7. *Vasilyev A.L.* Road design with respect to climatic traffic conditions. Moscow: Transport, 1986. 248 p. (In Russian)
8. *Samodurova T.V., Gladysheva O.V.* Road protection from snow. *Avtomobil'nye dorogi*. 2013; 11 (984): 77–80. (In Russian)
9. *Building Research Department, Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization.* Verification and improvement of snow control performance of windbreak fence. Research Report 2018.
10. *Kaneko M., Watabe T., Matsuzawa M.* Revision of highway snowstorm countermeasure manual. Focus on snowbreak woods. Transportation Research Circular, 2012. NoE-C162. Apr. Pp. 143–153.

Сведения об авторах

Санников Денис Николаевич, аспирант, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, BrownGr2@yandex.ru

Серватинский Вадим Вячеславович, канд. техн. наук, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, vservatinsky@sfu-kras.ru

Authors Details

Denis N. Sannikov, Research Assistant, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, BrownGp2@yandex.ru

Vadim V. Servatinsky, PhD, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, vservatinsky@sfu-kras.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 14.02.2024
Одобрена после рецензирования 15.03.2024
Принята к публикации 12.04.2024

Submitted for publication 14.02.2024
Approved after review 15.03.2024
Accepted for publication 12.04.2024

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 242–252.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 242–252.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.21.095:624.072.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252

EDN: FMLWKV

К ВОПРОСУ ВИБРОДИАГНОСТИКИ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ БАЛОК МЕТОДОМ ГЕРЦА

Владимир Михайлович Картопольцев

ООО «ДИАМОС», г. Томск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Рассмотрены вопросы вибродиагностики свободных колебаний балок пролетных строений металлических мостов на основе общей теории соударения тел по методу Герца. Динамическое взаимодействие груза и балки при ударе учитывает инерционность и ускорение в процессе колебания тел и представляет актуальную контактную теорию упругости и упругопластического деформирования.

Цель работы. На основе численного решения контактной задачи способом Л.И. Маламента и общей теории малых упругопластических деформаций определить зависимость ударного воздействия груза о балку и характеристики контактного процесса соударения тел, их инерционность и ускорение во времени.

Результаты. Совершенствуется механизм вычисления свободных колебаний балок пролетных строений мостов в условиях практической вибродиагностики, отвечающей современным требованиям теории колебания при динамическом воздействии нагрузки.

Ключевые слова: балка, удар, деформация, соударение, инерционность, ускорение, скорость

Для цитирования: Картопольцев В.М. К вопросу вибродиагностики свободных колебаний балок методом Герца // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 242–252. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252. EDN: FMLWKV

ORIGINAL ARTICLE

FREE VIBRATION MEASUREMENT OF BEAMS USING HERTZ'S METHOD

Vladimir M. Kartopoltsev

ООО "DIAMOS", Tomsk, Russia

Abstract. The paper deals with the problem of measuring free vibrations of metal bridge beams using the general theory of the body collision by Hertz's method. The load-beam dynamic interaction considers inertia and acceleration in the oscillation process of bodies and presents an up-to-date contact theory of elasticity and elastoplastic deformation.

Purpose: The aim of this work the numerical solution of the contact problem suggested by L.I. Malament and the general theory of small elastoplastic deformation, load/impact dependences of the beam, collision of bodies and their inertia and acceleration in time.

Research findings: The measurement of free vibrations of bridge span beams is improved in practical conditions, which meet the modern requirements of the theory of vibrations under the dynamic load.

Keywords: beam, impact, deformation, collision, inertia, acceleration, velocity

For citation: Kartopol'tsev V.M. Free vibration measurement of beams using Hertz's method. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 242–252. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-242-252. EDN: FMLWKV

Недостаток механизма вычисления свободных колебаний балок пролетных строений мостов отражен в технических условиях и специальных литературных источниках [1, 2]. Вибродиагностика свободных колебаний балок пролетных строений по методу Герца основана на соударении свободных тел и соблюдении условий: выполняется гипотеза плоских сечений Бернулли; используется теория изгибающего удара Сен-Венана и учитываются только местные деформации.

Процесс соударения зависит от соотношения веса сбрасываемого груза $Q_{гр}$ к весу балки пролетного строения и выражается отношением $\frac{m_{гр}}{m_б}$, рав-

ным: при легком грузе $\frac{m_{гр}}{m_б} \ll 0,5$ – однократное соударение; при тяжелом

грузе $\frac{m_{гр}}{m_б} \leq 0,5$ – соударение с «подскоком»; при очень тяжелом грузе

$\frac{m_{гр}}{m_б} = 0,2$ происходит движение балки и груза в период времени $10^{-4} - 10^{-2}$ с

с незначительным отрывом груза от балки.

Этапы удара и рассматриваемые гипотезы определяют вид удара – упругий или неупругий. Таким образом, свободные колебания балки в процессе ударного воздействия груза по методу Герца соответствуют равенствам:

– упругая стадия

$$\sigma_q \leq \sigma_{пу}; \quad (1)$$

– упругопластическая стадия

$$\sigma_q > \sigma_{пу}. \quad (2)$$

Скорость удара, при которой $\sigma_q \leq \sigma_{пу}$, – в балке отсутствует возможность появления пластических деформаций.

При $\sigma_q > \sigma_{пу}$ решения Буссинеску для упругого случая при ударе по методу Герца переходят в разряд упругопластических контактных задач Буссинеску – Боненблюста [3]. При вибродиагностике свободных колебаний по методу Герца с деформациями за пределом упругости основными будут являться параметры скорости удара и их изменения по мере изменения нагрузки удара и физического состояния (проявление инерционных импульсов и уско-

рения), а также напряженно-деформированного состояния, характеризуемого кривизной (\varkappa), напряжениями текучести σ_T и ε_{III} [4, 5].

Обобщенное выражение для скорости удара V_{III} , при котором возникает упругопластическое состояние балки, будет иметь вид

$$V_{III} = \varkappa_{III} \sqrt{\frac{EI}{A}}, \quad (3)$$

где \varkappa_{III} – предельная упругопластическая кривизна балки:

$$\varkappa_{III} = \frac{1}{2a^2} [y^I + 2\eta \cdot y^{II}]; \quad (4)$$

$$\eta = \frac{1}{4a^2} \frac{x^2}{t^y}; \quad a^2 = \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot A}}; \quad y^I = y_0 + y_1 + y_{II} + y_{III}; \quad y_0 = y_0^I + \Delta y_0.$$

Кривизна исходного состояния балки y_0 включает прогиб от собственного веса $y_0^I = \frac{5}{384} \frac{gl^4}{EI}$ и дополнительный прогиб Δy_0 за счет действия ускорения от свободного падения от веса балки, равного $y_0^I = 0,027 y_0$; y_1 – прогиб балки от веса $Q_{гр}$ в статической форме приложения, при соударении равен $\frac{Q_{гр} \cdot l^3}{48EI}$; y_{II} – прогиб балки за счет силы инерции падения груза $Q_{гр}$, равен $y_{ст} + V_I \cdot t^y$ или

$$y_{II} = V_I \sqrt{\frac{m_{гр}^{III} \cdot l^3}{48EI} \frac{1}{\left(1 + 0,5 \frac{m_6}{m_{гр}}\right)^2}},$$

где $m_{гр}^{III} = 0,5 \frac{Q_{гр}}{g}$ – приведенная масса груза; $m_{гр}$, m_6 – масса соответственно груза и балки; $m_{гр} = \frac{Q_{гр}}{g}$; $m_6 = \frac{P_6}{g}$; $g = 9,81$ м/с²; t^y – продолжительность соударения, определяется в зависимости от вида удара [6, 7]; V_I – скорость соударения тел в течение времени t^y ; y_{III} – прогиб от воздействия инерционного импульса (S) и ускорения a_y , определяется как $y_{III} = y_S^{III} + y^{III} a_y$; y_S^{III} – прогиб от инерционного импульса S [8]:

$$y_S^{III} = \frac{S}{n_y} \sqrt{\frac{g \cdot n_i}{C_x \cdot P_6}}; \quad n_1 = 0,5; \quad n_2 = \frac{5}{8};$$

$$S = \frac{2a^2}{EI} \sqrt{P_{уд} \cdot t^y}; \quad P_{уд} = 2Q_{гр};$$

$C_x = \frac{l}{3} - \frac{l}{2}$ – абсцисса ординаты приложения нагрузки $Q_{гр}$; y_{ay}^{III} – прогиб от ускорения a_y в балке, равен:

$$y_{ay}^{III} = \frac{g^2 \cdot 2h}{a_y^2}; \quad a_y = g \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2hEA}{l \cdot Q_{гр}}} \right).$$

Приняв скорость деформации балки при ударном динамическом нагружении $V_{\epsilon_{пл}}$ и упругопластическую кривизну $\varkappa_{пл}$ зависимостью (3), которая соответствует обобщенной силе удара P_{max} , вызванной не только упругим, но и пластическим деформированием, в соответствии с источниками [8, 9] P_{max} будет равно:

$$P_{max} = \frac{17}{35} m_6^{пр} \cdot \bar{\eta} + \frac{48EI}{l^3} \bar{\eta}, \quad (5)$$

где $m_6^{пр} = \frac{17}{35} m_1$; $m_1 = \frac{P_6}{g}$; $P_6 = A \cdot \rho \cdot l$ – вес балки; $\bar{\eta}$ – изгибной параметр, равен $\frac{1}{4a^2} \frac{x^2}{t^y}$; EI – жесткость балки при изгибе.

Максимальный упругопластический прогиб балки будет равен:

$$y_{дин}^{max} = y_{ст} + V_{спл} \cdot t^y, \quad (6)$$

где $y_{ст} = \frac{P_{max} \cdot l^3}{48EI}$; l – длина пролета балки.

Равенство для динамического изгибающего момента, соответствующего $\varkappa_{пл}$ и $y_{дин}^{max}$, имеет вид

$$M_{дин} = EI \cdot \varkappa_{пл}. \quad (7)$$

Опираясь на исследования ряда авторов [10, 11, 12], выражение (4) приводим к виду $\varkappa_{пл} = \frac{8y_{ст} \left(\frac{l}{2} \right)}{l^2}$ в стадии упругопластического деформирования. Зависимость кривизны балки (\varkappa), местного смятия в месте соударения, характеризующаяся коэффициентом α и контактной силой удара $P_{уд}$, определяется из равенства для P_{max} [13, 14]:

$$\alpha = \varkappa \cdot P_{уд}^{2/3} + \varkappa \cdot P_{max}, \quad (8)$$

где $P_{уд} = 2Q_{гр}$; $P_{max} = \sqrt{\frac{m \cdot V_1^2}{\varkappa}}$ при $V_1 = V_{спл}$; $m = \frac{m_{гр}^{пр} \cdot m_6^{пр}}{m_{гр}^{пр} + m_6^{пр}}$; \varkappa – коэффициент

восстановления, является энергетической характеристикой удара и зависит от геометрии ударяемых поверхностей в зоне контакта, веса, скорости и материалов соударяемых тел. Для упругих тел $\varkappa = 1,0$; для упругопластических $\varkappa = 0,7$.

На промежутке соударения t^y контактная сила удара будет P , $P = P_{\max} \cos \frac{t^y}{\sqrt{m \cdot \alpha}}$; $t^y = 3 \cdot 10^{-4} - 4,5 \cdot 10^{-4}$ с – рекомендует С.П. Тимошенко; $t^y = 5 \cdot 10^{-4}$ с – по опытам Масоне – Рогестера; t^y – эксперименты автора [6].

В формуле (8) выражение $\kappa \cdot P^{2/3}$ отвечает стадии упругого деформирования, а $\kappa \cdot P_{\max}$ – соответственно упругопластического. Исследования Н.Н. Давиденкова, а также вибродиагностика мостов балочной системы показали, что при плотном соударении справедлива зависимость при экспресс-расчетах кривизны балки по формулам [15, 16]. Изменения кривизны балки за пределом упругости от проявления инерционного импульса (S) рассмотрены в работах [8, 16].

Зависимость между величиной инерционного импульса (S) и кривизной (κ) за пределом упругости получена в виде

$$\kappa = \frac{S}{1,3m_{\text{гр}}} a^2, \quad (9)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса груза при ударном воздействии.

Известно, что во время соударения груза с балкой груз как бы останавливается, но в этот короткий t^y мс период времени соударения груз передает балке определенный инерционный импульс (S) и ускорение (a_y):

$$a_y = \frac{P}{m} \text{ см/с}^2, \quad (10)$$

где P – значение контактной силы в процессе удара в течение времени t^y [17, 18].

На исходе продолжительности времени соударения и начала процесса ускорения движения балки значение силы P численно равно кинетической энергии удара, равной P_{\max} :

$$P_{\max} = P \left(1 - \frac{\eta^2}{4} \right), \quad (11)$$

где

$$P = \frac{Q_{\text{гр}} \cdot V_1^2}{2g} \frac{1 + \frac{5 A \cdot l \cdot \rho}{8 Q_{\text{гр}}}}{\left(1 + \frac{5 A \cdot l \cdot \rho}{8 Q_{\text{гр}}} \right)^2};$$

V_1 – скорость соударения на протяжении времени t^y в зависимости от вида удара; $\frac{5}{8} A \cdot l \cdot \rho \approx 0,635 A \cdot l \cdot \rho$ – в момент, когда упругопластический изгиб балки по параболе совпадает с главной гармоникой синусоиды.

Вычисляем максимальное ускорение (a_y^{\max}) от P_{\max} по формуле

$$a_y^{\max} = \frac{1}{m} \left[P_{\max} \frac{1+n}{\theta \cdot n} \right]^{\frac{1}{1+n}}, \quad (12)$$

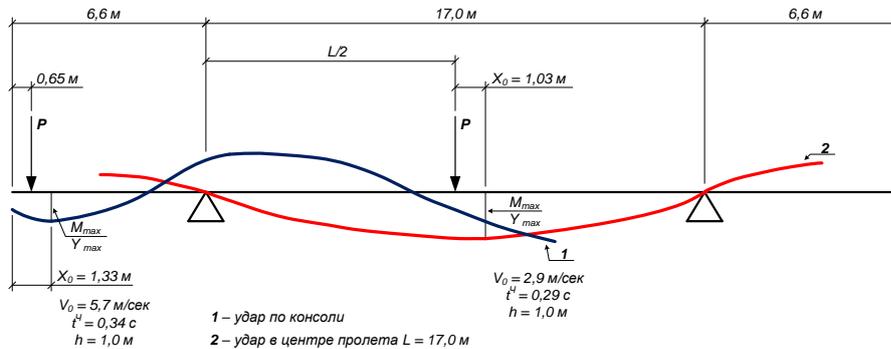
где θ – угол наклона груза к балке при соударении. При плоском соударении θ равен 1; n зависит от конфигурации сжимаемых тел, принимается равным 1.

Рассматривая ускорение (a_y) функцией времени t^y , формулу (12) запишем в следующем виде:

$$a_y^{t^y} = a_y^{\max} (\sin \rho \cdot t^y), \quad (13)$$

где $\rho = \frac{\pi}{2t^y}$; $t^y = \frac{\pi}{2} \sqrt{m a_y^{\max}}$.

При сосредоточенном ударе грузом по балке деформация ее по длине принимает вид волнистой кривой, распространяясь от точки удара влево и вправо, а не от точки начала координат балки (рисунок).



Экспериментальные формы свободных колебаний балки:

1 – удар по консоли; 2 – удар в середине пролета $l_p = 17,0$ м

Experimental modes of free vibrations:

1 – impact on the console; 2 – impact in the middle of the span $l_p = 17.0$ m

Первое значение χ_0 в зависимости от S при скорости удара в пределах 3,34 мс до 1 с приближённо равно:

$$\chi_0 = 2,134 \sqrt{\frac{EI}{A \cdot \rho}} \sqrt{t^y}, \quad (14)$$

где χ_0 – абсцисса ординаты сечения, где появляются максимальные значения изгибающего момента, напряжений и деформаций. Исследования на мостах балочной и балочно-консольной системы показали, что в большинстве случаев при $P_{\max} \approx 2Q_{гр}$ возникают пластические деформации в растянутых крайних фибрах ограниченной величины $\epsilon_{пл} \approx 0,0001$ и выполняется условие (3) в виде

$$V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = \alpha_{\text{пл}} \sqrt{\frac{EI}{A}} \cong 2,087V_1. \quad (15)$$

Из условия известной функциональной зависимости $V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = f(S, \chi_0)$ запишем равенство вида

$$V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = 2,134 \sqrt{\frac{EI}{A}} \sqrt{t^y}.$$

Значения изгибающего момента $M(\chi_0)$ и поперечной силы $Q^{\text{пл}}$ определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} M(\chi_0) &= -4a^2 \frac{(t^y)^{3/2}}{l} \frac{EI}{\rho A}; \\ Q^{\text{пл}} &= \frac{1}{a\sqrt{t^y}} \sqrt{\eta} \frac{dM(\chi_0)}{d\eta}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При $V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = 5,0$ м/с $\chi_0 = 45$ см;

$V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = 7,6$ м/с $\chi_0 = 47,0$ см;

$V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = 10,0$ м/с $\chi_0 = 48,3$ см;

$V_{\varepsilon_{\text{пл}}} = 15$ м/с $\chi_0 = 50,0$ см.

Максимальное динамическое напряжение в балке в сечении χ_0 из условия равенства $M(\chi_0) = \frac{Sl}{4}$ равно:

$$\sigma_{\text{дин}} = \frac{Z_{\text{max}}}{l} \sqrt{\frac{12EQ}{Al}}, \quad (17)$$

где Z_{max} – расстояние от нейтральной оси сечения балки до крайней растянутой фибры; S – инерционный импульс, при котором $M(\chi_0) = M_{\text{max}}$, $S = \frac{4\sigma_{\text{дин}}W}{l}$ [19].

Значения частоты и периода собственных колебаний в стадии проявления S и a_y определены на основании условия

$$P_0^{S, a_y} = 2,2 \sqrt{\frac{EI}{m_1 l^3}} \text{ или } 0,15 \text{ л/с}; T_0^{S, a_y} = \frac{2\pi}{P_p},$$

где P_p – коэффициент частоты собственных колебаний.

Общий вид выражения для определения P_p будет

$$P_p^i = i^2 \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot l^4}}. \quad (18)$$

При ударе сосредоточенным грузом о балку формула (18) трансформируется в выражение для различных схем балок [20]:

$$P_p^i = \sqrt{\frac{1}{\delta_{II} \cdot m_{тр}}}, \quad (19)$$

где $\delta_{II} = \frac{l^3}{192EI}$ – для балок, свободно опертых на опорах; $\delta_{II} = \frac{l^3}{3EI}$ – для консольных балок.

Для балок с защемленными консолями и комбинированных систем при $i = 1, 2, 3$ формула для P_p^i имеет вид

$$P_p^1 = 3,92 \sqrt{\frac{EI}{m_1 \cdot l^3}} \quad i = 1; \quad P_p^2 = 19,6 \sqrt{\frac{EI}{m_1 \cdot l^3}} \quad i = 2; \quad P_p^3 = 41,6 \sqrt{\frac{EI}{m_1 \cdot l^3}} \quad i = 3.$$

Изменение кривизны балки от удара в стадии инерционного импульса и ускорения за счет дополнительного влияния сдвиговых деформаций от поперечной силы имеет практическое доказательство в исследованиях ряда авторов [21].

Представляя сдвиг при динамическом упругопластическом деформировании функцией T_Q , запишем равенство

$$T_Q = \frac{2a^2}{EI} \sqrt{t^y \cdot Q^{III}}, \quad (20)$$

где Q^{III} – поперечная сила упругопластического состояния балки, определяется из выражения $Q^{III} = \eta^1 \cdot A \cdot G \cdot \Theta$, $G = \frac{E}{3}$ – модуль сдвига, η^1 – параметр обновления распределения касательных напряжений в сечении балки, принимается в зависимости от формы поперечного сечения: прямоугольной – 0,667–0,75, двутавровой – 0,72–0,84; Θ – угол поворота нейтральной оси сечения балки при сдвиге, является параметром деформации сдвига на нейтральной оси от поперечной силы Q^{III} и соответствует решению Ренкина – Грасхофа, равен:

$$\Theta = \gamma_{сдв} = \frac{3}{2} \frac{Q^{III}}{A \cdot G}, \quad (21)$$

где A – площадь поперечного сечения балки.

Дополнительный прогиб (Δy^Q) за счет сдвига и действия поперечной силы Q^{III} будет определяться в соответствии с изменением кривизны балки из формулы

$$\Delta y^Q = \frac{M(x_0)}{A \cdot G \cdot \Theta}, \quad (22)$$

где $M(x_0) = -\frac{EI}{2a^2} \frac{S}{\sqrt{\eta^1}}; \quad \eta^1 = \frac{(\chi_0)^2}{4a^2 t^y}.$

Тогда полный прогиб равен:

$$y_{\text{дин}} = y_{\text{дин}}^{\text{max}} + \Delta y^{\text{Q}}. \quad (23)$$

При вибродиагностике мостов балочно-консольных систем получены следующие результаты: при $\varepsilon_x = 0,08$; $\varepsilon_y = 0,07$; $\varepsilon_{\text{хлп}} = \ln(1 + \varepsilon_x) \cong 0,001$ величина $\Delta y^{\text{Q}} \cong 0,03-0,05$ % от $y_{\text{дин}}^{\text{max}}$.

Таким образом, пренебрегая колебаниями, вызванными центральным ударом вдоль линии, соединяющей центры масс груза и балки, целесообразно рассматривать свободные колебания с учетом поправок на давление от сдвига в отсутствие понижения динамического предела текучести (σ_T) на протяжении времени соударения t^y . Появление местных пластических деформаций в месте контакта соударения груза о железобетонную или асфальтобетонную поверхность проезжей части моста или покрытия носит точечный характер, и они не могут быть распространены на деформации всей поверхности или сечения. Сила контактного удара будет зависеть от формы соприкосновения груза с балкой, времени соударения и коэффициента восстановления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллов В.С. Эксплуатация и реконструкция мостов и труб на автомобильных дорогах. Москва : Транспорт, 1971. 196 с.
2. Картопольцев В.М., Картопольцев А.В., Черепанов Д.Н. Совершенствование учебных программ углубленной подготовки специалистов транспортного строительства расширением уровней компетенций // Природные интеллектуальные ресурсы Сибири. (СИБРЕСУРС (29-2023) : доклады 29-й Международной научно-практической конференции. Томск : Изд-во ТУСУР, 2023. С. 34–73.
3. Дюве П., Кларк, Боненблюст К. Поведение длинных балок при ударной нагрузке. Механика. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1950. С. 53–63.
4. Рахматулин Х.А., Демьянов Ю.А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961. 399 с.
5. Койтер В.Т. Общие теоремы теории упругопластических сред. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1968. 78 с.
6. Гольдсмит Вернер. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. Москва : Изд-во литературы по строительству, 1965. 430 с.
7. Рахматулин Х.А., Каримбаев Т.Дж., Байтелиев Т. Применение метода пространственных характеристик к решению задач по распространению упругопластических волн // Известия Академии наук Казахской ССР. Серия физико-математическая. 1973. № 1. С. 59–66.
8. Gillis P.P., Kolly M. On the Determination of stress Strain. Strain-Rate Relations From Dynamic // Vtam Tests ASME, 1969. P. 266–268.
9. Aspden R.J, Camble J.D. Proceedings Royal Society. London, Serions A, 1966. V. 278. 266 p.
10. Галин А.П. Поперечные колебания балок и плит за пределом упругости под действием взрывных и ударных нагрузок // ПММ. 1953. Т. XVII. № 4. С. 84–96.
11. Сэндерс Е.Л. Соотношение между напряжениями и деформациями в пластической области, основанной на линейных функциях напряжения // Механика. 1956. № 3 (37). С. 99–109.
12. Фрейденталь А., Гейрингер Х. Математические теории неупругой сплошной среды : пер. с англ. Москва : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1962. 432 с.
13. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. Киев : Наукова Думка, 1969. 246 с.
14. Model R. Kombinationstrelo nanlines Stonnastisch Errington Schwingnggs – Sustems // ZAMM. 1978. № 58. 377 p.

15. *Бойко В.И.* О соударении упругопластических тел // Украинский математический журнал. 1961. № 3. С. 16–20.
16. *Батуев Г.С., Федосов А.А., Ефремов А.К.* Соударение массивных тел при упругопластических деформациях в зоне контакта // Расчеты на прочность : сб. статей. Вып. 10. Москва : Машиностроение, 1964. С. 363–381.
17. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. Москва ; Ленинград : Гостехиздат, 1945. 751 с.
18. *Бидерман В.Л.* Теория удара. Москва : Машигиз, 1952. 73 с.
19. *Рахматулин Х.А.* О распространении упругопластических волн при сложном нагружении // Прикладная математика и механика. Том XXII. Москва : Академия наук СССР, 1958. Вып. 6. С. 759–771.
20. *Булгаков Б.В.* Колебания. Москва : Гостехиздат, 1954. 891 с.
21. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. 575 с.

REFERENCES

1. *Kirillov V.S.* Operation and reconstruction of bridges and pipes on highways. Moscow: Transport, 1971. 196 p. (In Russian)
2. *Kartopol'tsev V.M., Kartopol'tsev A.V., Cherepanov D.N.* Improvement of curricula for in-depth training of transport construction specialists by expanding the levels of competence. In: *Proc. 29th Int. Sci. Conf. "Natural Intellectual Resources of Siberia"*. Tomsk, 2023. Pp. 34–73. (In Russian)
3. *Duvet P. Clark, Bonenblust K.* Behavior of long beams under shock load. *Mechanics*. Moscow, 1950. Pp. 53–63. (Russian translation)
4. *Rakhmatulin H.A., Demyanov Yu.A.* Strength under intense short-term loads. Moscow, 1961. 399 p. (In Russian)
5. *Koiter V.T.* General theorems of the theory of elastoplastic media. Moscow, 1968. 78 p. (Russian translation)
6. *Goldsmith Werner.* Impact. Theory and physical properties of colliding bodies. Moscow, 1965. 430 p. (Russian translation)
7. *Rakhmatulin H.A., Karimbaev T.J., Baiteliev T.* Spatial characteristics method in solving problems of elastoplastic wave propagation. *Izvestiya Akademii nauk Kazakhskoi SSR. Ser. fiziko-matematicheskaya*. 1973; (1): 59–66. (In Russian)
8. *Gillis P.P., Kolly M.* On the determination of stress strain. Strain-rate relations from dynamic. *Btam Tests ASME*, 1969. Pp. 266–268.
9. *Aspden R.J., Camble J.D.* *Proceedings Royal Society. London, Ser. A*, 1966; 278: 266.
10. *Galin A.P.* Transverse vibrations of beams and plates beyond elastic limit under explosive and shock loads. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1953; 17 (4): 84–96. (In Russian)
11. *Sanders E.L.* The relationship between stresses and deformations in the plastic region based on linear stress functions. *Mechanics*. 1956; 3 (37): 99–109.
12. *Freudenthal A., Geiringer H.* Mathematical theory of an inelastic continuous medium. Translated from English. Moscow, 1962. 432 p. (In Russian)
13. *Kilchevsky N.A.* Theory of collision of solids. Kiev: Naukova Dumka, 1969. 240 p. (In Russian)
14. *Model R.* Kombinationstrelo nanlines Stonnastisch Errington Schwingnngs – Sustems. *ZAMM*. 1978; 58, 377.
15. *Boyko V.I.* On the collision of elastic-plastic bodies. *Ukr. Matem. Journal*. 1961; (3): 16–20. (In Russian)
16. *Batuev G.S., Fedosov A.A., Efremov A.K.* Collision of massive bodies with elastic-plastic deformations in the contact zone. In: *Strength Analysis*. Moscow, 1964. Pp. 363–381. (In Russian)
17. *Belyaev N.M.* Resistance of materials. Moscow; Leningrad: Gostekhizdat, 1945. 751 p. (In Russian)
18. *Biderman V.A.* Theory of impact. Moscow: Mashgiz, 1952. 73 p. (In Russian)
19. *Rakhmatulin H.A.* Elastoplastic wave propagation under complex loading. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1958; 22: 759–771. (In Russian)
20. *Bulgakov B.V.* Fluctuations. Moscow: Gostekhizdat, 1954. 891 p. (In Russian)
21. *Timoshenko S.P., Goodyear J.* Theory of elasticity. Moscow: Nauka, 1975. 575 p. (In Russian)

Сведения об авторе

Картопольцев Владимир Михайлович, докт. техн. наук, профессор, ООО «ДИАМОС», 634003, г. Томск, пер. Соляной, 24/1, diamos@mail.ru

Author Details

Vladimir M. Kartopoltsev, DSc, Professor, ООО “DIAMOS”, 24/1, Solyanoy Str., 634003, Tomsk, Russia, diamos@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.2024
Одобрена после рецензирования 17.04.2024
Принята к публикации 22.04.2024

Submitted for publication 08.04.2024
Approved after review 17.04.2024
Accepted for publication 22.04.2024